

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Vorgelegt von

Dipl. Ing. (FH) Hans Kiening

Geboren am 16.07.1968
In München

Tag der mündlichen Prüfung
4.12.2002

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. R.Woll
1 Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Falter
2 Gutachter:	Prof. Dr. sc. nat. Sigurd Kusch
3 Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Fellbaum

System zur Beschreibung der objektiven Bildgüte digitaler Filmbelichter



Hans Kiening
Lenggries 2002

Inhaltsverzeichnis

1	LEISTUNGSMERKMALE DER PHOTOGRAPHISCHEN SCHICHT	11
1.1	SCHWÄRZUNGSKURVE UND SPEKTRALE BEWERTUNG	11
1.2	EMPFINDLICHKEIT	13
1.3	SPEKTRALE EMPFINDLICHKEIT	14
1.4	KÖRNIGKEIT UND SIGNAL-RAUSCH-ABSTAND	14
1.5	OPTISCHE ÜBERTRAGUNGSFUNKTION MTF (BANDBREITE).....	16
1.6	BILDLAGE UND GRÖÖE	18
1.6.1	<i>Dispersive Abbildungsfehler</i>	<i>19</i>
1.6.2	<i>Steuerparameter des ARRILASER.....</i>	<i>20</i>
1.6.3	<i>Absolute Position des Bildes</i>	<i>21</i>
1.7	STREULICHT.....	21
1.8	HELLIGKEITSVERTEILUNG.....	22
1.9	ZUSAMMENFASSUNG DER ZU MESSENDEN PARAMETER	23
2	SYSTEMBEDINGTE UND PSYCHOOPTISCHE BESCHRÄNKUNGEN	24
2.1	VERSCHLECHTERUNG DER MTF DURCH DEN KOPIERPROZESS	24
2.1.1	<i>MTF eines Musters bei Kopierung vom Original-Negativ.....</i>	<i>25</i>
2.1.2	<i>MTF eines Musters bei Kopierung vom Intermed-Negativ</i>	<i>27</i>
2.2	AUFLÖSUNGSVERMÖGEN UND BILDSCHÄRFE BEI BETRACHTUNG EINES KINOFILMBILDES	28
2.2.1	<i>Herstellung eines subjektiven Testfilms.....</i>	<i>31</i>
2.2.2	<i>Herstellung eines objektiven Testfilms zur Messung der MTF.....</i>	<i>34</i>
2.3	FAZIT	35
3	AUFBAU DES MESSSYSTEMS	36
3.1	PRINZIPIELLER ABLAUF.....	36
3.2	AUFBAU DES UNIVERSALTESTBILDES	36
3.3	BELICHTEN DES TESTBILDES.....	41
3.4	SCANNEN DES TESTBILDES.....	41
3.4.1	<i>Funktionsweise eines Zeilenscanners.....</i>	<i>41</i>
3.4.2	<i>Die Scan-Auflösung.....</i>	<i>41</i>
3.4.3	<i>Dichteumfang und Maximaldichte</i>	<i>42</i>
3.4.4	<i>Farbtiefe</i>	<i>42</i>
3.5	FILMHALTERUNG MIT REFERENZMARKEN	43
4	REFERENZIERUNG UND KALIBRIERUNG DES SYSTEMS.....	46
4.1	GEOMETRISCHE REFERENZIERUNG	46
4.2	PHOTOMETRISCHE REFERENZIERUNG	47
4.3	BESTIMMUNG DES SCANNER-FARBRAUMES	49
4.3.1	<i>Zusammenhang zwischen Scannerdichten und Densitometerdichten</i>	<i>52</i>
4.3.2	<i>Umrechnung der Scannerdichten in Status-M-Dichten.....</i>	<i>53</i>
4.4	MTF DES SCANNERS	56
4.5	ZUSAMMENFASSENDE AUFLISTUNG DER KOMPENSATIONSVEKTOREN:.....	57

5	MESSPROZEDUREN	58
5.1	BESTIMMUNG DER LAGEPARAMETER UND BERECHNUNG DER KOMPENSATIONSGRÖßEN	58
5.2	AUTOMATISCHES FINDEN DER REFERENZ- UND PASSPUNKTE	60
5.3	PHOTOMETRISCHE PARAMETER – DENSITOMETRIE	62
5.4	RMS, SIGNALSTÖRABSTAND	63
5.5	HOMOGENITÄT DER BELICHTUNG	64
5.6	STREULICHT, EINGEFÜHRT DURCH DIE LASERBELICHTUNG	65
5.7	LINEARITÄTSÜBERPRÜFUNG DER AKUSTO-OPTISCHEN MODULATOREN	66
5.8	MODULATIONS ÜBERTRAGUNGSFUNKTION MTF	68
5.8.1	<i>Kompensation der Phasenlage</i>	68
5.8.2	<i>Berechnung der MTF</i>	73
5.8.3	<i>Berücksichtigung von Signalstörungen</i>	75
6	BENUTZEROBERFLÄCHE DER SOFTWARE	76
6.1	LADEN DES SCANS „OPEN AQUA SCAN“	76
6.2	MTF	77
6.3	ANPASSUNG FÜR DIE SUBJEKTIVE BETRACHTUNG „SUBTRACT BASE AND INVERT“	77
6.4	GEOMETRY CHECK	78
6.5	DENSITOMETRY CHECK	79
6.6	SHADING CHECK, FLAIR CHECK (HOMOGENITÄT UND STREULICHT)	79
6.7	EINIGE ZUSATZFUNKTIONEN	81
7	AUSBLICK	82

System zur Beschreibung der objektiven Bildgüte digitaler Filmbelichter

Einführung

Ein kurzes Plädoyer für das "Zelluloid"

Das Medium Film hat sich seit mehr als hundert Jahren zur hochwertigen und langzeitkonstanten Speicherung von Bildern bewährt. Erstaunlich ist, dass in einer Welt, in der kaum ein Technologiebereich vor der digitalen Revolution verschont geblieben ist, eine analoge Technik mit solch erstaunlicher Stabilität ihr Segment behaupten kann.

Digital Video Broadcast, virtuelles Studio oder digitale Displaytechnologien, kaum ein "analoger" Bereich in der Medienwelt ist geblieben. Fernsehproduktionen werden digital aufgezeichnet, nachbearbeitet und übertragen. In naher Zukunft, so sagt man, wird zu jedem Zuschauer eine bidirektionale Datenleitung führen, die ihm "Video on Demand" ermöglicht und Videotheken in den Ruin treiben soll, wie diese einst das Kino.

Nun, „Totgesagte Leben länger“, denn Kino erlebt seit Jahren eine Renaissance, die auch der "progressivste Zwangs-Digitalist" nicht von sich weisen kann.

Es mag paradox klingen, aber gerade die immer kürzer werdenden Innovationszyklen in der digitalen Speichertechnik sind es, die den Film weiter am Leben halten. Es scheint als würde der Fortschritt sich hier selbst im Wege stehen, denn je häufiger sich ein Technologiewandel vollzieht, desto mehr stellt sich die Frage nach der Haltbarkeit des Bildes.

Ein gern zitiertes Beispiel, die 5 ¼“ Diskette, vor 10 Jahren Standard bei der Speicherung von Daten am PC, ist heute verschwunden. Selbst eine CD garantiert, durch simulierte Alterungstests, höchstens eine Speicherzeit von 50 Jahren und das auch nur, wenn dann die nötigen Lesegeräte noch verfügbar sind.

Was bleibt ist eine verständliche Unsicherheit, denn letztlich geht es nicht nur um die Speicherung von Information, sondern im Falle vom Kinofilm um die einzige Repräsentation einer Investition, die dreistellige Millionenbeträge erreichen kann.

Niemand wird sich der digitalen Revolution ernsthaft in den Weg stellen können und wollen, trotzdem sei die Überlegung gestattet, ob der digitale Zeitgeist in jedem Fall einen funktionellen Gewinn bringt.

Beschreibt man die photographische Schicht einmal in nachrichtentechnischem Jargon, so stellt sie nicht nur einen Bildsensor dar, sondern dient gleichzeitig auch als Bildspeicher mit der Kapazität von 10 Bit pro Korn. Für ein normales Kameranegativ (100ASA) ergibt sich daraus eine Informationsdichte von 50 MB pro Bild, bei einem 90-minütigen Spielfilm also rund sechs Terra Byte. Dies bei einer physischen Speichergröße, die sich in drei Büchsen problemlos mit einem Fiat 500 transportieren lässt. Ein Unterfangen, das sich mit den Festplatten, die derzeit für eine adäquate digitale Speicherung von Nöten wäre, sicher scheitern dürfte, von den Kosten ganz abgesehen.

Die Projektion steht der Aufzeichnung indes kaum an eindrucksvollen Daten nach; ein Bus bzw. Speichersystem, das einen Datendurchsatz von 1,2 GByte pro Sekunde schafft, mit einer Technik die international auf einem Standard beruht.

Ob nun wirklich das "New Golden Age of Film" anbrechen wird, wie Kodak vor einiger Zeit verkündete, oder dieses nur amerikanischer Traditionsoptimismus ist, sei dahingestellt. Eines steht jedoch fest: Film ist kein verstaubtes Relikt aus grauer Vorzeit, sondern ein zuverlässiges und zeitgemäßes Bildspeichermedium, das die Vorteile der digitalen Technik dort sinnvoll ergänzen kann, wo (zur Zeit

noch) Engpässe vorliegen. Das heißt als universeller, hochqualitativer und lange Zeit konstanter Bildspeicher und als Wiedergabemedium für die Großflächenprojektion im Kino.

Der Weg zum bewegten Bild hat sich seit dem Einzug digitaler Technik freilich deutlich verändert, sichtbar nicht nur durch spektakuläre Spezialeffekte, sondern oft durch die überzeugende Nachbildung natürlicher Gegebenheiten. Diese Technik wird Digitalfilm genannt und kommt überall dort zum Einsatz, wo konventionelle Filmtechnik die Kreativität der Gestaltung beschränkt, oder zu umständlich ist. Ihre Möglichkeiten reichen von der simplen Einblendung von Text, bis hin zur kompletten digitalen Rekonstruktion historischer Drehorte, wie z.B. letztes Jahr mit „Gladiator“, eine inzwischen mit einem Oscar ausgezeichnete Hollywoodproduktion, für deren Handlung im antiken Rom das Kolosseum als perfekte Illusion auf der Leinwand wieder hergestellt wurde.

Der Ablauf der digitalen Filmbearbeitung für das Kino folgt in der Regel dem in *Abb.E.1* dargestellten Weg. Teile des Kameranegatives werden mittels eines Scanners digitalisiert, die gewonnenen Bilddaten in der gewünschten Form manipuliert und dann zurück auf Film belichtet.

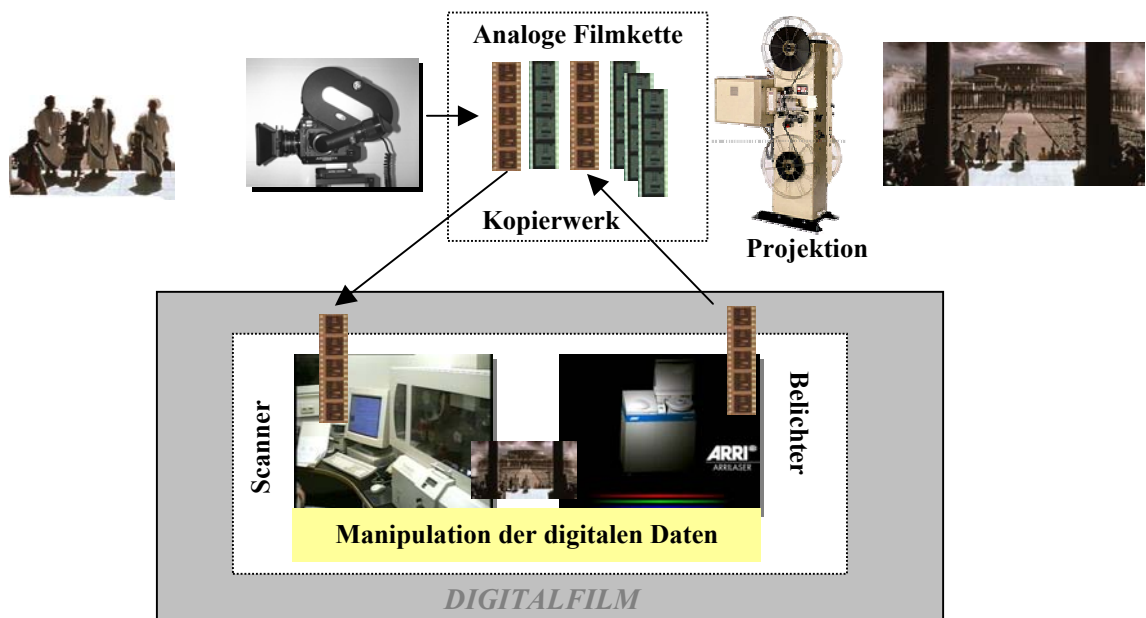


Abb.E.1.: Digitalfilm

Während alle marktüblichen Filmscanner das Negativ mit der gleichen Technologie und ähnlicher Qualität digitalisieren, gibt es bei den Belichtern verschiedene technologische Ansätze, von denen sich jedoch nur zwei für die kommerzielle Nutzung durchgesetzt haben. Dies sind die CRT-Belichter (Cathode Ray Tube, Kathodenstrahlröhren) und Systeme, die den Film durch Verwendung von Festkörperlaser belichten. Für CRT basierende Systeme gibt es weltweit derzeit drei Anbieter, Laserbelichter werden ausschließlich von Arnold & Richter München hergestellt.

Funktionsprinzip des CRT-Belichters

CRT-Recorder verwenden eine Kathodenstrahlröhre, die weit über der Auflösung herkömmlicher Monitore liegt. Sie setzen sich generell aus zwei Baugruppen, dem Wiedergabeteil (Röhre) und dem Aufnahmeteil (Kamerakopf), zusammen.

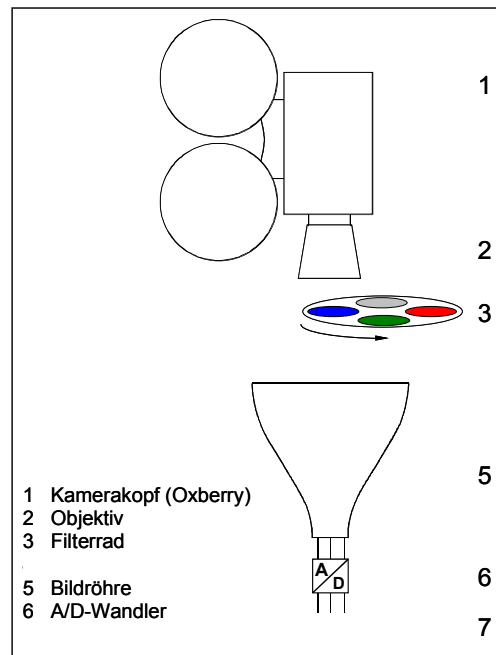


Abb.E.2.: Prinzip CRT-Recorder

In der Leuchtschicht der Röhre werden nur Phosphore eines Typs verwendet. Um ein farbiges Bild zu erhalten, muss bei diesem Verfahren gefiltert werden. Zu diesem Zweck ist der Röhre ein Filterrad nachgeschaltet, das Filter in den drei additiven Primärfarben, also Rot, Grün und Blau, verwendet. Die Bildinformation wird sequentiell in drei Durchgängen belichtet.

Als Kamerakopf dient ein System mit doppeltem Sperrgreifer, das bedeutet, dass der Film während der Belichtung über zwei Passtifte registriert wird. Die Belichtung erfolgt zeilenweise progressiv (ohne Leerzeilen) in Ruhelage. Der Transport zur Belichtung des nächsten Bildes läuft intermittierend ab.

Funktionsprinzip des Laser Belichters

Belichtet wird der Film bei diesem Prinzip von drei Festkörperlaser, für die Farben Rot, Grün und Blau. Diese befinden sich, wie in *Abb.E.3.* dargestellt, im räumlich abgetrennten Bereich des Optikmoduls. Die „Grundhelligkeit“ der drei Laser wird über Neutralsichtfilter *ND* eingestellt. Im akusto-optischen Modulator (AOM) wird die Intensität des Laserstrahls moduliert. Dazu wird ein Kristall mit einer akustischen Welle angeregt, die entsprechend der Bildinformation moduliert ist. Der Laserstrahl wird am Kristallgitter gebeugt. Dabei ändert sich die Strahlintensität mit der Amplitude der angelegten akustischen Welle [L E1].

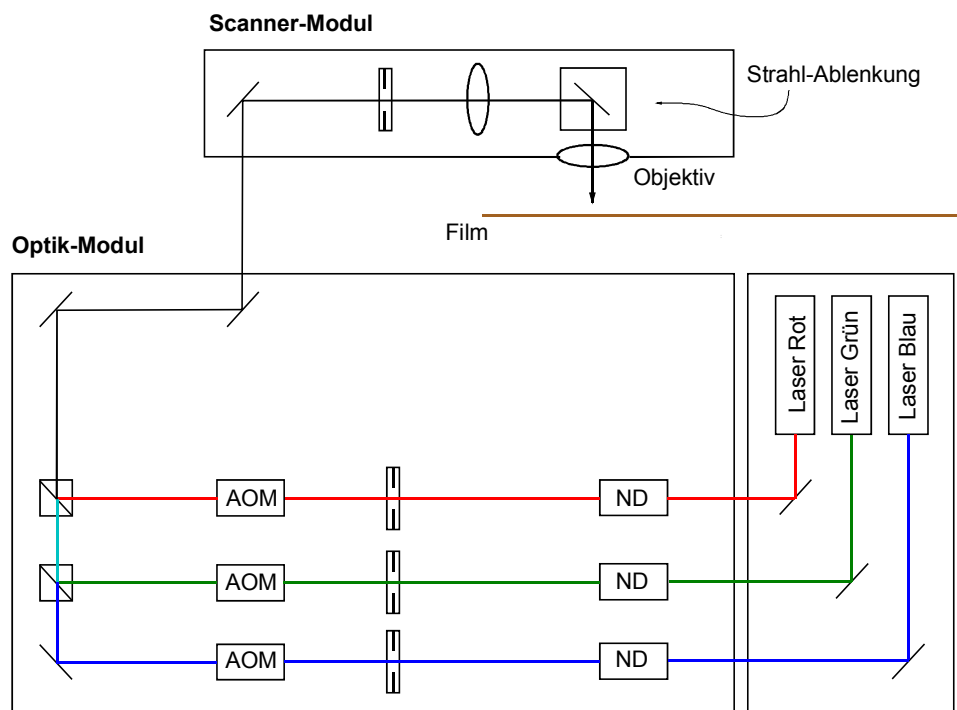


Abb.E.3.: Optischer Aufbau, bestehend aus dem Optik-Modul und dem Scanner-Modul

Nach der Vereinigung der drei Laserstrahlen RGB (Rot/Grün/Blau) wird der kombinierte Strahl in die darüber liegende Ebene geführt (Scanner-Modul) und über ein einziges schnell rotierendes Pentaprisma abgelenkt (*Abb.E.4.*).

Ein speziell entwickeltes $f\theta$ -Objektiv der Firma Rodenstock bündelt den Strahl und fokussiert ihn in der Filmebene. Die besondere Eigenschaft des $f\theta$ -Objektivs ist die Fokussierung des rotierenden Parallelstrahls auf eine ebene Fläche. Auf diese Weise wird pro Umdrehung des Pentaprismas jeweils eine Zeile auf den Film belichtet. Die Filmebene wird während der Belichtung mit konstanter Geschwindigkeit quer zur Richtung des abgelenkten Strahls bewegt, so dass Zeile für Zeile das gesamte Filmbild beschrieben wird.

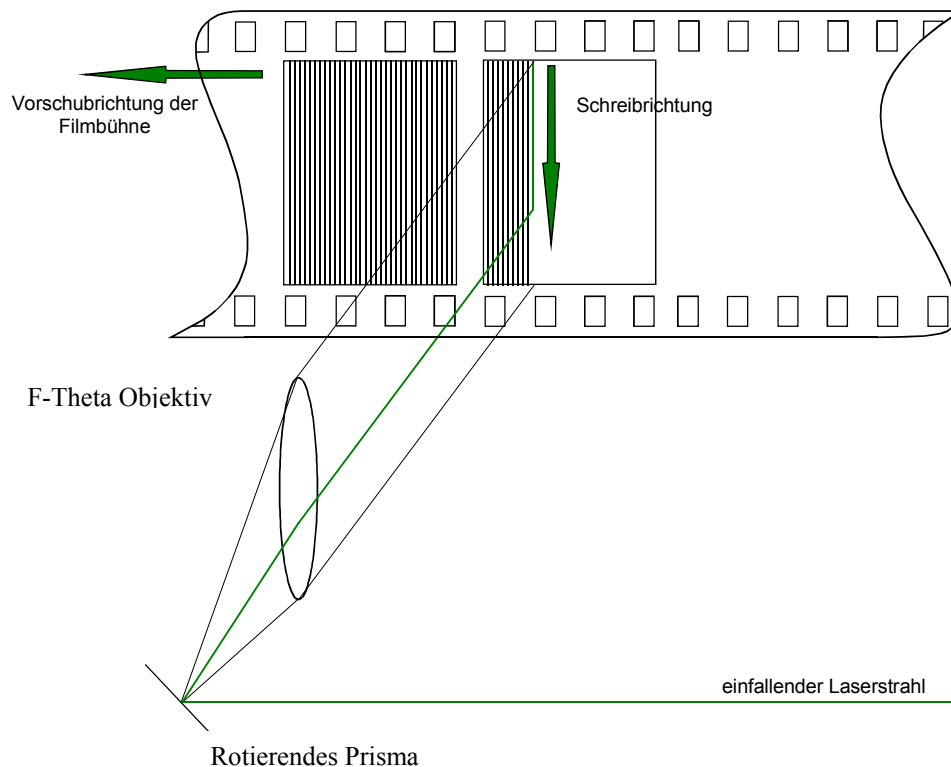


Abb.E.4.: Strahlableitung und Filmvorschub (Scanner Modul)

Vorstellung des Inhaltes

Ziel der im Weiteren vorgestellten Arbeit ist die Erstellung eines Mess- und Kalibriersystems für einen digitalen Filmbelichter: den ARRILASER.

Während dessen Herstellung werden die einzelnen Produktionsstufen anhand der erreichten Bildqualität auf dem belichteten Negativ überprüft. Für diese Aufgabe waren zunächst die wichtigsten Parameter festzulegen, geeignete Messverfahren zu erstellen, zu systematisieren und weitgehend zu automatisieren.

Einige der Gütekriterien, wie z.B. die Bildlage oder die Konvergenz in Richtung des schreibenden Laserstrahles, sind durch Softwareparameter kontrollierbar. Diese Parameter sollten durch eine Auswertung der Messdaten neu berechnet werden, um aufgetretene Belichtungsfehler zu kompensieren.

Dies konnte anfänglich nur durch eine Vielzahl von Messgeräten erledigt werden. Für die Bestimmung geometrischer Größen wurde ein Messmikroskop mit X-Y-Tisch verwendet, für die Ermittlung von Filmdichten ein Densitometer sowie ein Mikrophotometer für die Messungen der optischen Übertragungsfunktion.

Für die Überprüfung auf Artefaktfreiheit ergab sich eine weitere Schwierigkeit: Da sich ein Filmnegativ durch seine Maskierung und die umgekehrte Darstellung nicht für eine subjektive Betrachtung eignet, musste es zur Beurteilung erst auf Positiv umkopiert werden. Die durch den analogen Kopierprozess zwangsläufig entstehenden Verluste schränken die Aussagekraft der Kopie deutlich ein. Es ist nicht mehr möglich eindeutig zu identifizieren, ob ein erkannter Fehler nicht erst durch die Kopie erzeugt wurde.

Kurzum: die Qualitätsüberwachung gestaltete sich äußerst umständlich und war so absolut ungeeignet, die Serviceingenieure bei ihren inzwischen weltweiten (86 Installationen) Einsätzen zu unterstützen.

Es bestand dringend der Bedarf, ein „transportables Verfahren“ zu schaffen, das durch einen Techniker bedienbar, eine schnelle und signifikante Aussage über die wichtigsten Qualitätsparameter eines ARRILASER's erlaubt, Grenzwertüberschreitungen anzeigt und Kompensationsparameter berechnet.

Realisiert wurde dies durch die Entwicklung eines Verfahrens, das eine Filmprobe zusammen mit einem hochpräzisen Referenzmuster scannt. Durch Kalibrierung jeder Messung auf die Referenz und durch Transformation der Messdaten in photometrische und geometrische Standardeinheiten, konnte für das System ein handelsüblicher Diascanner verwendet werden. Die Besonderheit des Verfahrens ist, dass anhand eines einzigen Testbildes alle relevanten Parameter weitgehend automatisch gemessen werden können.

Im Verlauf der Entwicklung hat sich dieses Messsystem zu einem Produkt entwickelt, das ARRILASER-Kunden als Qualitätsüberwachungsinstrument angeboten wird. Ein Exemplar befindet sich derzeit bei Kodak (Rochester, USA) und soll nach erfolgreicher Zertifizierung als standardisiertes Messverfahren für die Qualitätsbewertung von 35 mm Cine-Film empfohlen werden.

Kurzübersicht

In **Kapitel 1** wird zunächst die Grundthematik der Bildspeicherung auf eine photographische Schicht erläutert, ebenso die erzielbaren Leistungsmerkmale bei der digitalen Belichtung durch einen ARRILASER. Abschließend werden hier die zu ermittelnden Qualitätsparameter festgelegt.

Kapitel 2 verfolgt die Qualitätsveränderung des Negatives durch die nachgeschalteten Produktionswege bis ins Kino. Wichtigster Punkt in diesem Kapitel ist die Untersuchung der psychooptischen Leistungsfähigkeit des Betrachters und die Ermittlung von Schwellwerten der Wahrnehmung. Dies geschieht mit dem Hintergrund, eine Korrelation zwischen Messgröße und subjektiver Empfindung herzustellen.

Kapitel 3 zeigt das Konzept für ein Messverfahren und erklärt die Technologie, die dem Verfahren zu Grunde liegt.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Kalibrierung des Messsystems, mit Versuchen zur Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit und der Überführung der Messgrößen in geometrische und photometrische Standardeinheiten.

Kapitel 5 erklärt das Vorgehen zur Ermittlung der vereinbarten Qualitätsparameter und die dahinter stehenden mathematischen Modelle.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und beschreibt die Benutzeroberfläche der entstandenen Analysesoftware sowie die Aufbereitung der Messdaten.

1 Leistungsmerkmale der photographischen Schicht

Dieses Kapitel befasst sich mit Grundlagen und Leistungsmerkmalen der Bildspeicherung durch eine photographische Schicht. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Gegebenheiten einer digitalen Filmbelichtung.

Eine wichtige Rolle für die Leistungsmerkmale des „Digitalfilms“, spielt die Quantisierung der Filmdichten und des Ortes, die nicht nur die erreichbare Qualität beschränken, sondern gleichwohl die Grenzwerte für das Messsystem darstellen, das diese beschreiben soll. Die Dimensionen des dabei verwendeten Datenformates stammen aus einer sehr essentiellen Anforderung an den „Digitalfilm“ – die Transparenz: das bedeutet, das synthetische Bild soll nicht von einem natürlichen (mit einer Kamera belichteten) zu unterscheiden sein. Zusammenfassend werden alle für die Qualitätsbeurteilung relevanten Parameter vereinbart.

Aufbau und Funktionsweise der photographischen Schicht

Auf einem Schichtträger aus Kunststoff, ist eine Suspension aus Gelatine aufgebracht. Die Korngröße der lichtempfindlichen Silberhalogenide beträgt ca. $0.1\ \mu\text{m}$ - $3\ \mu\text{m}$, die Schichtdicke $6\ \mu\text{m}$ - $20\ \mu\text{m}$ [L1.1]. Da die statistisch verteilten Kristalle dadurch in mehreren Lagen übereinander angeordnet sind, entstehen unregelmäßige Kornanhäufungen und -überdeckungen.

Einfallende Photonen können, sofern sie ausreichend Energie besitzen und auf ein Korn treffen, absorbiert werden, und es entsteht das latente Bild. Dieses wird erst durch den anschließenden Entwicklungsprozess, bei dem belichtete Kristalle zu metallischem Silber reduziert werden, als Negativ sichtbar gemacht.

Farbaufnahmen werden möglich durch die Verwendung dreier übereinanderliegender Schichten, von denen jede für den Wellenlängenbereich einer der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau sensibilisiert ist. Durch die Oxidation sogenannter Farbkuppler, die in diesen Schichten enthalten sind, werden belichtete Stellen in den Komplementärfarben Cyan, Magenta oder Gelb (Yellow) eingefärbt. Der Gesamteindruck des Negativs entsteht dann im Durchlicht durch subtraktive Farbmischung.

Die meisten der nachfolgend beschriebenen Eigenschaften und Kennzahlen betreffen nicht die Photoschicht allein, sondern sind auch abhängig vom Entwicklungsprozess. Im Folgenden impliziere der Ausdruck „photographische Schicht“ daher immer auch deren Entwicklung. Diese Eigenschaften sind jeweils nur gültig für einen bestimmten Filmtyp, die angegebenen Zahlenwerte beziehen sich auf das bei der digitalen Filmbelichtung hauptsächlich verwendete Filmmaterial 5242.

1.1 Schwärzungskurve und spektrale Bewertung

Die photographische Schicht des Filmes reagiert auf die Belichtung H

$$H = E * t \quad E = \text{Beleuchtungsstärke [lx], } t \text{ Beleuchtungszeit [s]} \quad (1.1)$$

mit zunehmender Lichtundurchlässigkeit bzw. mit abnehmender Transmission τ .

Die relative Transmission $\frac{I}{\tau}$ nennt man „Opazität“ und deren logarithmische Darstellung

$$\text{ist die Dichte } D = \lg \frac{I}{\tau}. \quad (1.2)$$

Dieser universell gültige Zusammenhang wird bei der Verwendung von Farbnegativmaterial etwas komplizierter. Während das belichtete Silber eines Schwarzweißfilmes für alle Wellenlängen bei der

Durchleuchtung gleich dämpft, ergibt sich bei Farbfilm eine deutliche spektrale Abhängigkeit. Diese entsteht durch die verwendeten Farbkuppler und die Färbung des Trägermaterials der sogenannten „Base“, die bei der Belichtung die Farbtrennung verbessern soll. Diese spektrale Abhängigkeit muss bei der Dichtemessung insofern berücksichtigt werden, dass man klar festlegt, bei welcher Wellenlänge bzw. mit welcher Filterfunktion die Messung stattfindet.

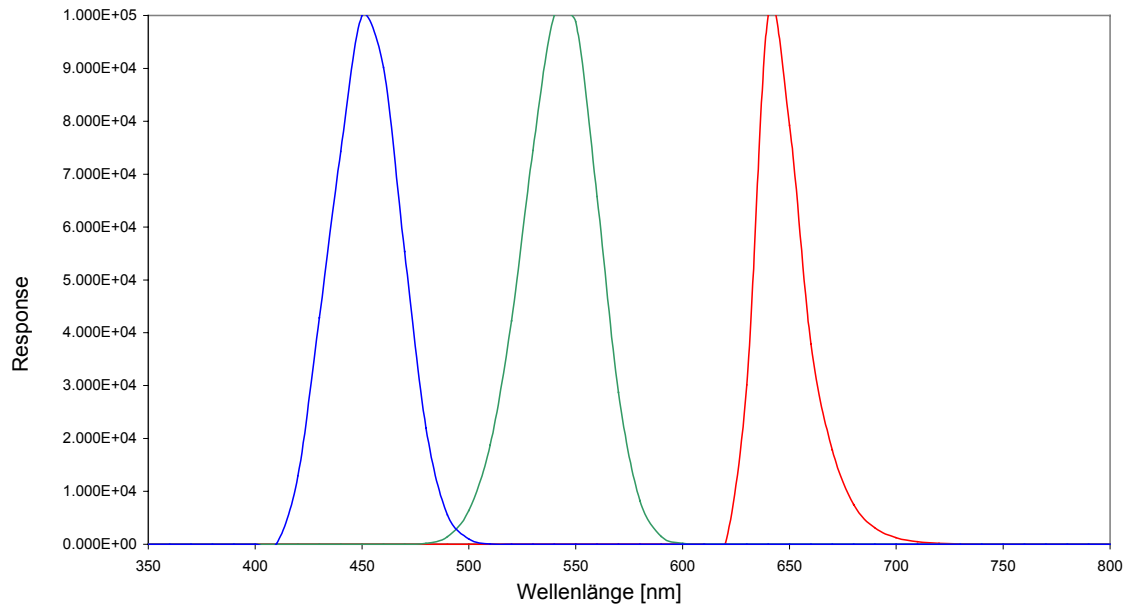


Abb.1.1.: Spektrale (normierte) Helligkeitsverteilung der Status M Charakteristik

Die dargestellten spektralen Bewertungskurven werden als Status M bezeichnet und international zur Messung der Dichten in den 3 Farbschichten von Farbnegativmaterial verwendet. Stellt man nun die mit Status M bewertete Dichte als Funktion von $\lg H$ (Belichtung) dar, ergibt sich die in Abb.1.2. links gezeigte, nicht lineare Belichtungskurve (Kennlinie).

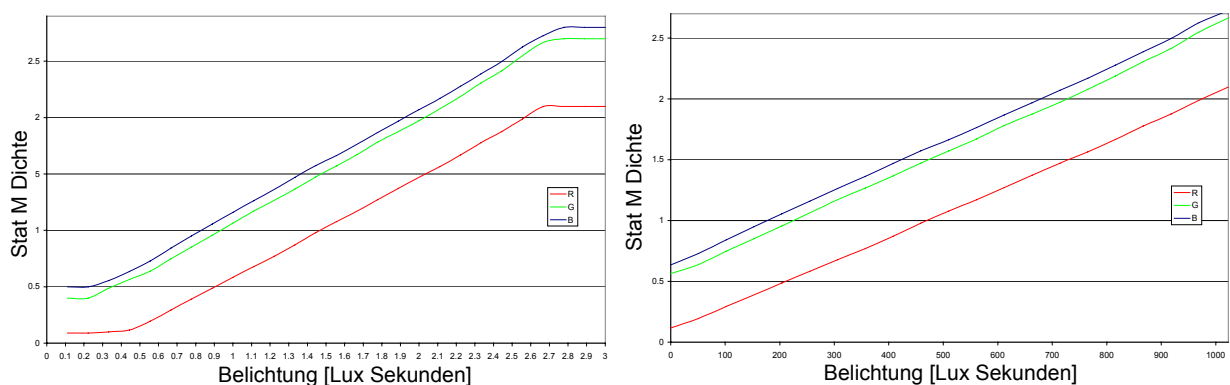


Abb.1.2.: Kennlinie des Materials 5242 und Verwendung des linearen Bereiches

Auf der Abszisse wird die Belichtung H in logarithmischem Maßstab aufgetragen, auf der Ordinate die Dichte. Wie in Abb.1.2. links zu sehen ist, hat die Schwärzungskurve einen S-förmigen Verlauf, beginnend bei der Schleierdichte D_{min} , der Dichte des unbelichteten Films. Der Bereich um den Wendepunkt, zwischen den Dichten D_{min} und D_{max} , ist näherungsweise linear und wird in der Regel für die Belichtung der digitalen Werte genutzt Abb.1.2. rechts.

Für das Kodak 5242 Material liegen diese Werte bei :

	ROT	GRÜN	BLAU
D_{min}	0,12	0,56	0,64
D_{max}	2,10	2,67	2,73

Die Steigung der Wendetangente gibt den Gammawert der Schicht an.

$$\gamma = \frac{\Delta D}{\Delta \log H} \quad (1.3)$$

Wie aus *Abb.1.2.* zu sehen, gilt für das Material 5242 bei korrekter Entwicklung ca. $\gamma = 1$.

Mit den Gleichungen (1.2.) und (1.3.) kann der Zusammenhang zwischen dem Transmissionsgrad τ und der Belichtung H, bzw. da die Belichtungszeit für die gesamte Schicht gleich ist, der Beleuchtungsstärke E hergestellt werden.

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} = \left(\frac{H_{max}}{H_{min}} \right)^\gamma = \left(\frac{E_{max}}{E_{min}} \right)^\gamma \quad (1.4)$$

Bei der digitalen Filmbelichtung wird der Bereich zwischen D_{min} und D_{max} mit 1024 Stufen quantisiert (*Abb. 1.2.*). Es ergibt sich also ein $\Delta D_{min} \approx 0,002 D_{R,G,B}$.

1.2 Empfindlichkeit

Die Lichtempfindlichkeit der photographischen Schicht ist abhängig von der Korngröße (je größer das Korn, desto empfindlicher) und wird angegeben durch die DIN Zahl S oder die ASA-Zahl S_x .

$$\text{DIN: } S = 10 \log \frac{H_M}{1 \text{ lxs}} \quad \text{ASA: } S_x = \frac{0,8 \text{ lxs}}{H_M} \quad (1.5)$$

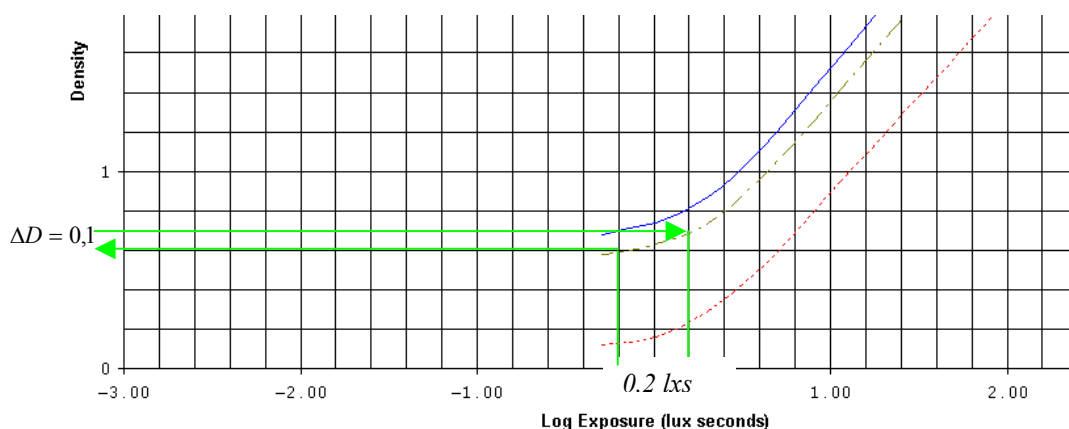


Abb.1.3.: Berechnung der Empfindlichkeit bei Dichte 0.1 über Schleier

Dabei ist H_M die Belichtung in Lux Sekunden [luxs], die eine Dichte D_M bewirkt, die um $\Delta D = 0,1$ über dem Schleier liegt. Für das 5242 Material ergibt sich durch delogarithmieren:

$$H_M = 10^{\text{LogExposure}} = 10^{0,2} = 1,584 \quad (1.6)$$

und eine ASA Empfindlichkeit von $S_x = \frac{0,8 \text{ luxs}}{1,584 \text{ luxs}} = 0,5$ (1.7)

1.3 Spektrale Empfindlichkeit

In Abb.1.4. ist die von der Wellenlänge abhängige Empfindlichkeit des Filmmaterials dargestellt. Die Wellenlänge der drei emittierten Linienspektren der Laser liegen zwar in der Nähe der Sensibilitätsmaxima, führen jedoch insbesondere bei Blau zu einer ungewollten Belichtung der grünen Schicht. Dieser Effekt wird *Farbnebensprechen* oder *Crosstalk* genannt und spielt eine Rolle bei der photometrischen Kalibrierung der Lichtmengen.

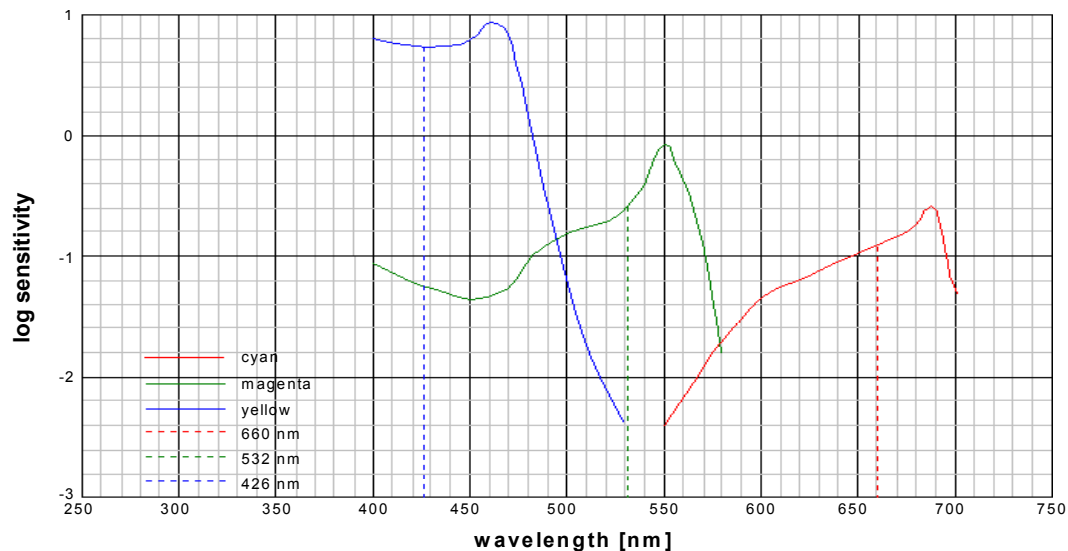


Abb.1.4.: Laser Wellenlänge ARRILASER - spektrale Empfindlichkeit EXR 5242

1.4 Körnigkeit und Signal-Rausch-Abstand

Wird die photographische Schicht gleichmäßig belichtet, so entstehen dennoch Schwankungen in der Dichte, die sogenannte Körnigkeit bzw. das Filmkornrauschen. Die Ursache dafür liegt nicht so sehr in der Größe der Silberhalogenidkristalle, sondern mehr in der bereits erwähnten unregelmäßigen Verteilung des Korns.

Verschiedene chemische Effekte machen die Körnigkeit zusätzlich dichteabhängig. Sie kann durch densitometrische Messung der Dichteschwankung $\overline{AD(D)}$ bestimmt werden [LI.2]. Angegeben wird meist die Größe

$$\text{Diffuse RMS Granularity} = 10^3 * \sqrt{\overline{AD^2}} \quad (1.8)$$

Dabei ist $\overline{AD^2}$ das mittlere Schwankungsquadrat der Dichte (Rauschleistung), gemessen mit einer Kreisblende des Durchmessers $48 \mu\text{m}$ und bei mittlerer Dichte.

Typische Werte für die Diffuse RMS (Root Mean Square) Granularity liegen zwischen 10 und 40 und steigen mit der Größe des Korns, d.h. der Filmempfindlichkeit.

Der Signal-Rausch-Abstand (kurz SNR, Signal to Noise Ratio,) in deziBel (dB) kann bestimmt werden zu

$$SNR = 20 \log \frac{\sqrt{\Delta D^2(D)}_0}{D - D_0} [dB] \quad (1.9)$$

Dabei stellt die Dichte über dem Schleier $D - D_0$ das Nutzsignal und $\sqrt{\Delta D^2(D)}$ die effektive Rauschamplitude dar. Allgemein erhält man am unteren Ende des linearen Teils der Schwärzungskurve ein maximales SNR, da $D - D_0$ zunächst stärker zunimmt als $\sqrt{\Delta D^2(D)}$ [L1.3].

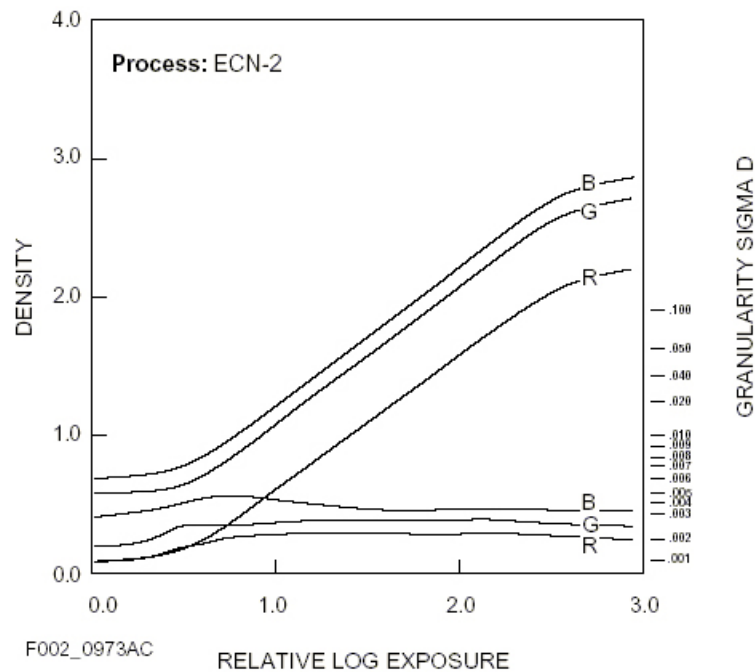


Abb.1.5.: RMS Granularity als Maß für das Rauschen in Abhängigkeit der Filmdichte

Für die Kodak 5242 Schicht lässt sich die Diffuse RMS Granularity aus den Standardabweichungen der Dichten bei Belichtung im mittleren linearen Bereich der Kennlinie berechnen.

$$\overline{\Delta D_{R,G,B}^2} = \sigma D_{R,G,B} = 0,002..0,003 \quad (1.10)$$

für Rot ergibt sich damit z.B. bei einer Schleierdichte von $D_0 = 0,15$ und einer mittleren Dichte $D = 1,03$

$$RMS = 10^3 * \sqrt{\sigma D_R} = 10^3 * \sqrt{0,002^2} = 2 \quad (1.11)$$

$$SNR_R = 20 * \log_{10} \left(\frac{2 * 10^3}{1,03 - 0,15} \right) = 67,13 \text{ dB} \quad (1.12)$$

Neben dem Kornrauschen treten bei der Filmbelichtung mit einem Laser zusätzliche Störgrößen auf. In Richtung des scannenden Strahles kann das Lasersignal selbst verrauscht sein. Senkrecht dazu, in Transportrichtung, können Schwankungen oder Störungen des Linearantriebes zu Inhomogenitäten der Filmdichte führen. Dies bedeutet, dass die Messapertur gegebenenfalls bis auf einen Pixel zu reduzieren ist.

1.5 Optische Übertragungsfunktion MTF (Bandbreite)

Die optische Bandbreite wird häufig auch als Auflösungsvermögen bezeichnet und gibt an wie viele Linien je Winkereinheit noch getrennt abgebildet werden können. In der Bildebene, also auf dem Film, erfolgt die Angabe durch die Anzahl von Linienpaaren pro mm [Lp/mm]. In der Nachrichtentechnik ist dies nichts anderes als die Bandgrenze des Systems. Die räumlichen Perioden werden hier als Ortsfrequenz bezeichnet.

Der Einfluss der lichtempfindlichen Schicht auf die Detailwiedergabe wird primär durch ihre physikalische Beschaffenheit, die Art der Belichtung und die Verarbeitungsprozesse bestimmt. Die resultierende Körnigkeit schränkt das Auflösungsvermögen ein. Sie ist weniger durch die Größe der Körner bestimmt, als durch unregelmäßige Kornzusammenballungen, die auch als Farbstoffwolken bezeichnet werden. Der Durchmesser dieser sogenannten Cluster liegt zwischen $0,2\mu$ und 6μ . Dabei bestimmt die statische Verteilung dieser Anhäufungen den Grad des Auflösungsvermögens. Die umfassendste Aussage über die Detailabbildung liefert die Modulationsübertragungsfunktion MTF.

Die Messung der MTF erfolgt mit Hilfe von räumlich periodisch angeordneten hellen und dunklen Linien, deren Leuchtdichteverteilung sinusförmig zwischen einem Maximum und einem Minimum liegt.

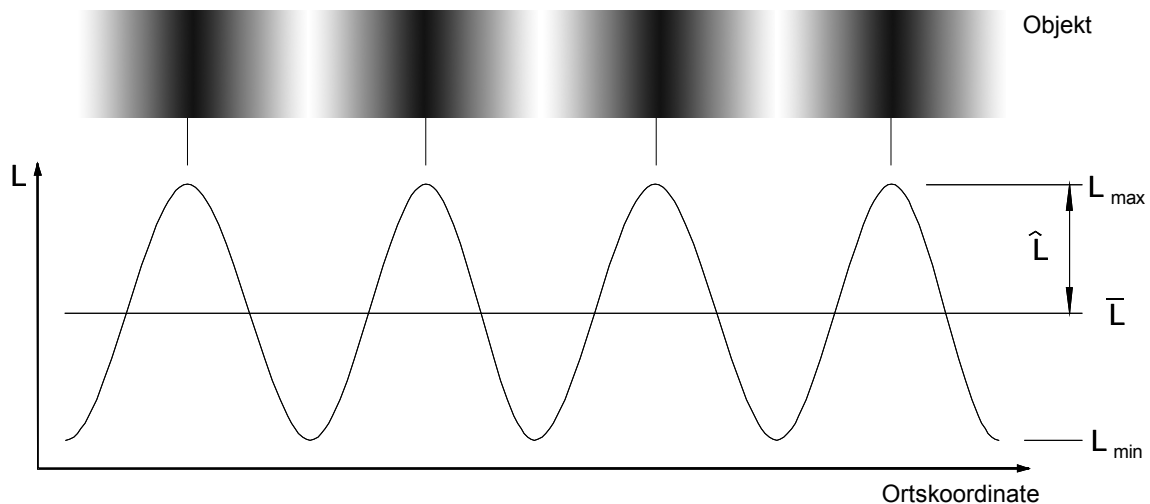


Abb.1.6.: Modulationsübertragung

Für die Amplitude der Leuchtdichteverteilung ergibt sich:

$$\hat{L} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \quad (1.13)$$

und für den Mittelwert der Leuchtdichteverteilung:

$$\bar{L} = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (1.14)$$

Als Modulation M definiert man daraus:

$$M = \frac{\hat{L}}{\bar{L}}, \quad \text{also} \quad M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (1.15)$$

Die maximal erreichbare Modulation beträgt $M = 1$.

Für die Einwirkung auf die Filmschicht ergibt sich entsprechend

$$M = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad (1.16)$$

mit $H = E * t$ Belichtung, was bei konstanter Belichtungszeit t zu

$$M = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (1.18)$$

führt, mit E = Beleuchtungsstärke auf dem Film.

Nach Entwicklung des Negativmaterials weisen die Testproben unterschiedliche Transmissionsgrade auf, so dass sich hierdurch ergibt:

$$M = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_{\max} + \tau_{\min}} \quad (1.19)$$

Der Modulationsübertragungsfaktor T bezeichnet in diesem Fall das Verhältnis zwischen Modulation im Objekt und der Modulation auf dem Film:

$$T = \frac{M_{\text{Film}}}{M_{\text{Objekt}}} \quad (1.20)$$

Die Tatsache, dass hier direkt mit den Transmissionen gerechnet werden kann, liegt darin begründet, dass bei dem verwendeten Filmmaterial ein linearer Zusammenhang (mit Steigung = 1) zwischen Beleuchtung und Transmission angenommen werden kann. Anderenfalls müssten die gemessenen Transmissionen erst durch die Kennlinie zurücktransformiert werden. Der Modulationsübertragungsfaktor, als Funktion der Ortsfrequenz, ergibt dann die Modulationsübertragungsfunktion MTF (engl. Modulation Transfer Function).

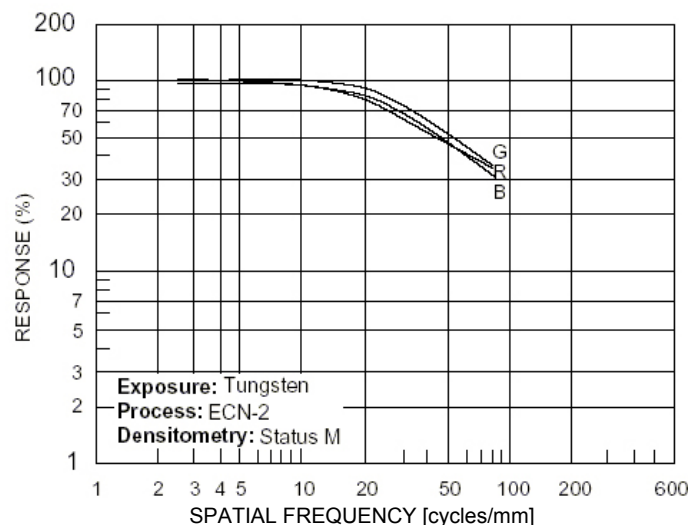


Abb.1.7.: Kodak 5242 MTF

Die Ortsfrequenz, bei der die MTF so weit abgefallen ist, dass das Signal nicht mehr nutzbar ist (10-20% Modulation) wird als Bandgrenze oder Auflösungsgrenze bezeichnet. Bei dem verwendeten Kodak 5242 Material liegt die Bandgrenze bei ca 100 Lp/mm . Bei der Belichtung von Kameranegativ mit einer exzellenten Aufnahmeoptik erreicht man diesen Wert unter günstigen Umständen. Bei der digitalen Filmbelichtung liegt die Bandgrenze bei 80 Lp/mm , ein Wert, der durch die Auflösung von Filmscannern bestimmt ist. Hier steht die Anforderung der Empfindlichkeit, die ja eine Funktion der Sensorgröße (Pixelgröße) ist, der der Auflösung entgegen. Ein vernünftiger Kompromiss scheint bei einer Pixelgröße von $6 \mu\text{m}$ erreicht, bei der die maximale Filmfläche mit $4096 * 3112$ Punkten quantisiert wird.

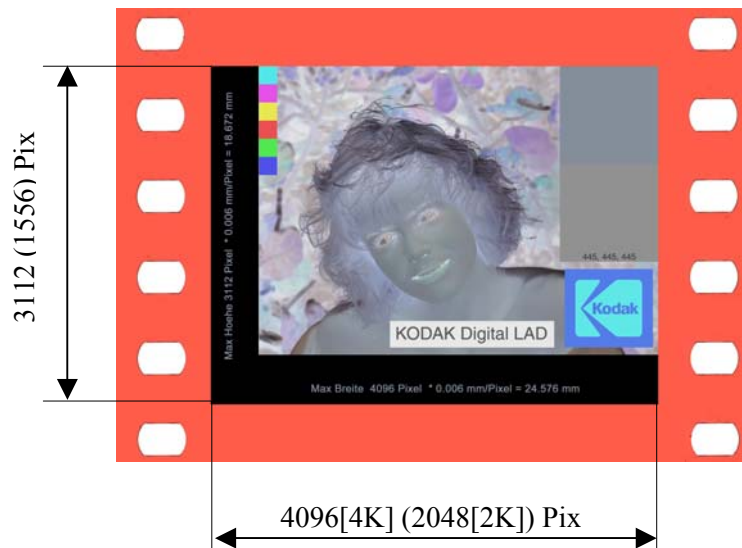


Abb.1.8.: 4K Bildgröße in Pixel

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Auflösungsgrenze allein noch nichts aussagt über die subjektiv empfundene Bildschärfe. Für diese ist es vielmehr entscheidend, bei niedrigen bis mittleren Ortsfrequenzen eine hohe MTF zu erreichen. In der Praxis hat sich sogar gezeigt, dass bei einer Quantisierung mit der halben Auflösung ($2048 * 1556$ Pixel bei einer Pixelgröße von $12 \mu\text{m}$) ausreichend gute Bilder erzeugt werden. Neben den Leistungsmerkmalen der photographischen Schicht, sind die Parameter von Wichtigkeit, die durch die Belichtungstechnik bestimmt werden, z.B. die Ausnutzung der Bildfläche und die Positionierung des Bildes in den Grundfarben.

1.6 Bildlage und Größe

Bei der im ARRILASER verwendeten Optik handelt es sich um ein F-Theta-Objektiv [$L 1.4$]. Mit diesem Objektiv ist es möglich, das über das Pentaprisma abgelenkte Laserstrahlenbündel in einer senkrecht zur optischen Achse stehenden Ebene zu fokussieren. Anders als bei geläufigen Objektiven wird dies durch eine speziell korrigierte Verzeichnung erreicht. Normalerweise wird von einem Objektiv Verzeichnungsfreiheit erwartet, damit es eine dem Objekt geometrisch ähnliche Abbildung liefert.

Verzeichnungsfreiheit liegt vor, wenn die Bildhöhe y' zur Objekthöhe y proportional ist. Auf den Objektwinkel Θ bezogen, gilt dann

$$y' = f * \tan \Theta \quad (1.21)$$

y' = Bildhöhe

f = Brennweite des Objektivs

Θ = Objektwinkel/ Ablenkwinkel

Ein derartiges Objektiv wäre jedoch für den Einsatz der Strahlablenkung im Recorder ungeeignet, da zwischen dem Ablenkungswinkel Θ und der Bildhöhe y' eine lineare Beziehung benötigt wird. Die geforderte Linearität wird durch die sogenannte F-Theta-Bedingung hergestellt, durch die das Objektiv eine definierte, negative (= tonnenförmige) Verzeichnung erlangt:

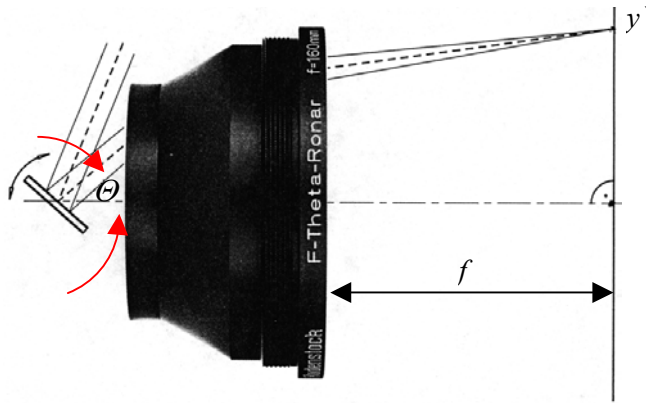


Abb.1.9.: F-Theta Objektiv

$$y' = f * \Theta \quad (1.22)$$

Mit der Proportionalität zwischen dem Ablenkungswinkel Θ und der Bildhöhe y' ist zugleich auch die Proportionalität zwischen der Winkelgeschwindigkeit des verwendeten Pentaprismas und der Schreibgeschwindigkeit in der Bildebene gewährleistet. Eine weitere Besonderheit des Objektivs ist, dass die Abbildung der Strahlen für den roten, grünen und blauen Kanal auf dem Film in konstantem Verhältnis zueinander stehen:

$$y'_R = \Theta * k_R \quad (1.23)$$

$$y'_G = \Theta * k_G \quad (1.24)$$

$$y'_B = \Theta * k_B \quad (1.25)$$

k = Konstante

1.6.1 Dispersive Abbildungsfehler

Als Dispersion wird allgemein die Abhängigkeit der Brechzahl optischer Werkstoffe von der Wellenlänge bezeichnet [L 1.5]. Auch hier stellt die Laserbelichtung einen Sonderfall dar.

Es handelt sich, anders als in der Photographie, nicht um ein zusammengesetztes oder kontinuierliches Beleuchtungsspektrum, sondern um drei diskrete Wellenlängen. Diese werden durch Dispersion in zweierlei Hinsicht beeinflusst, einmal in der Lage, das heißt, das rote, grüne und blaue Teilbild sind nicht deckungsgleich, es ergeben sich also Farbsäume an Kanten; der andere Aspekt ist der Einfluss der Wellenlänge auf die Größe und Form des Punktbildes, die sich sowohl als Farbsaum bemerkbar macht, wie auch als Variation in der Bildschärfe des monochromatischen Bildes.

Die dispersiven Lagefehler des verwendeten F-Theta-Objektivs, können durch Steuerparameter des Belichters kompensiert werden. Für den horizontalen Offset der Strahlen in Schreibrichtung wird dafür zunächst ein Verzögerungswert (Delay) festgelegt, durch den der Startzeitpunkt für jeden Kanal gesteuert werden kann. Weiterhin werden die zeitlich unterschiedlichen Abstände der Pixeltakte festgelegt (F-Theta Wert), so dass die geforderte Breite der zu belichtenden Zeile erreicht wird und die Strahlen zur Ausbelichtung der drei Farben konvergent sind.

Durch konstante Bewegung der Filmebene quer zur Schreibrichtung des Laserstrahls wird Zeile für Zeile in vertikaler Lage auf den Film belichtet. Abweichungen der Konvergenz in Vorschubrichtung des Films müssen durch Nachjustieren der Strahlenbündel optisch korrigiert werden.

1.6.2 Steuerparameter des ARRILASER

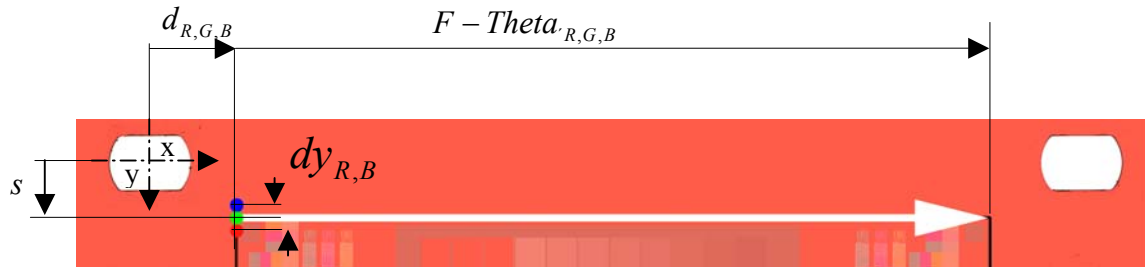


Abb.1.10.: Geometrische Steuerparameter

Delay : $d_{R,G,B}$ [μm]

Ein nach *RGB* getrennter Verzögerungswert in Richtung der geschriebenen Zeile, der den Ort des ersten Pixels in x bestimmt.

Sliding Carriage: s

Ein Verzögerungswert, gleichzeitig gültig für *RGB*, senkrecht zur Richtung der geschriebenen Zeile, der den Ort des ersten Pixels in y bestimmt.

F-Theta: $F\Theta_{R,G,B}$

Ein für *RGB* getrennter Spreizungsfaktor, der die Breite der geschriebenen Zeile bestimmt.

f = Pixeltakt

ν_0 = Nennumdrehung des Scanners: 60 000 U/min

$pitch$ = Pixelabstand

$$f = F\Theta \left(\frac{2\pi * \nu_0}{pitch} \right) \quad (1.26)$$

für die Bildbreite w gilt

$$w \sim \frac{1}{f} \text{ bzw. } w \sim \frac{1}{F\Theta} \quad (1.27)$$

Delta Y Rot, Blau: $dy_{R,B}$

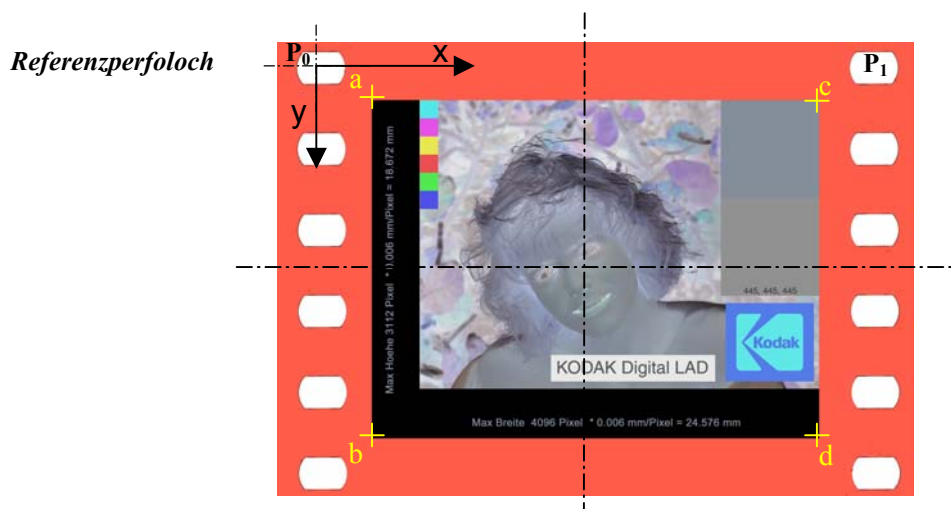
Ein Wert, der den Y-Konvergenzfehler in Rot bzw. Blau relativ zu Grün beschreibt. Dieser Wert ist nur durch die optische Justage der Strahlen in RGB zu beeinflussen und bedeutet ein mechanisches Eingreifen in den Belichter.

1.6.3 Absolute Position des Bildes

Die absolute Position eines Filmbildes ist nach DIN 15501 durch die Lage der vier Eckpunkte a, b, c, d relativ zum Referenzperfoloch p_0 definiert. Dieses wird zusammen mit p_1 bei der Filmbelichtung zur Registrierung durch die Sperrgreifer (zwei hochgenaue Passstifte) verwendet.

Die exakte Positionierung des Bildes ist für die Qualität der Kinoprojektion, die mit einer Vergrößerung von mehr als 1:600 stattfindet, von großer Wichtigkeit.

Störend sind besonders die sogenannten Bildstandsfehler, bei denen es sich um örtliche Verschiebungen von Bild zu Bild handelt.



P_0	X[mm]	Y[mm]
a	1,797	2,514
b	1,797	21,186
c	26,373	2,514
d	26,373	21,186

Abb.1.11.: Geometrische Position und Bildgröße

Desweiteren gehen selbstverständlich Abbildungsfehler der Optik mit ein, die in den Beschränkungen der abbildenden Elemente des Laserrecorders zu suchen sind.

1.7 Streulicht

Beim Durchgang des Lichtes durch ein Objektiv ist Lichtverlust unvermeidlich. Dieses ist bedingt einmal durch die Dicke von Glaselementen und deren Absorption von Licht und zum Anderen – und bedeutender – durch Lichtreflexion an jeder Glas/Luft-Fläche. Die Lichtreflexion an Glas/Luft-Flächen, zusammen mit anderen Reflexionen innerhalb des Strahlenganges, erreicht die Filmoberfläche als Lichtschleier, der sich entweder gleichmäßig oder partiell über die photographische Schicht legt. Dieser besonders in dunklen Bildpartien kontrastmindernde Lichtschleier wird Streulicht genannt. Streulicht wirkt sich subjektiv als störender „Lichtsäum“ oder als Helligkeitsverlauf über die Bildbreite aus.

Im Gegensatz zur Belichtung mit einer Kamera unterscheidet sich jedoch die Betrachtung dieses Abbildungsfehlers im Falle der Laserbelichtung.

Da das Bild nicht „auf einmal“ belichtet, sondern Zeile für Zeile geschrieben wird, tritt Streulicht nur entlang des scannenden Strahles auf und reproduziert sich senkrecht dazu.

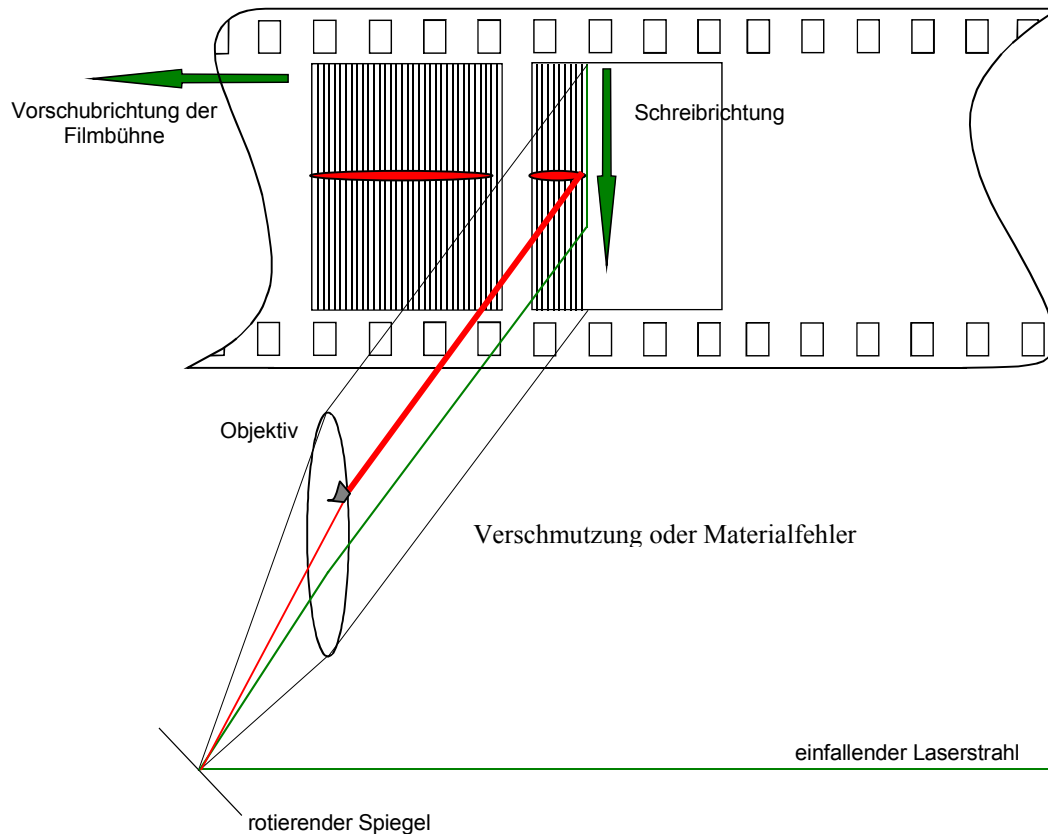


Abb.1.12.: Prinzip der Belichtung durch einen ARRILASER

1.8 Helligkeitsverteilung

Die Ausleuchtung des Bildfeldes durch das Objektiv ist nicht gleichmäßig. Der effektive Durchmesser des Lichtbündels ist bei senkrechtem Einfall am größten und wird bei schrägem Einfall kleiner. Dies führt zu einer natürlichen Abnahme der Beleuchtungsstärke E zum Rand hin, abhängig vom Einfallswinkel ω

$$E(\omega) = E_{\max} * \cos^4 \omega \quad (1.27)$$

Die bei „normalen“ Objektiven zusätzlich auftretende Beschneidung des einfallenden Bündels durch Blenden oder Fassungssteile (Vignettierung) entfällt bei der Verwendung eines F-Theta Objektives, da dieses ohne Blende und nur für Einfallswinkel verwendet wird, bei denen der einfallende Strahl nicht in die Nähe der Fassung kommt. Der Lichtstrom durch das Objektiv wird hier ausschließlich durch den unterschiedlichen Glasweg des scannenden Strahles und den Transmissionsfaktor τ vermindert.

1.9 Zusammenfassung der zu messenden Parameter

Es erscheint sinnvoll, die zu messenden Parameter grundsätzlich in photometrische und geometrische zu unterteilen.

Photometrisch

- Überprüfung der R, G, B Kennlinien durch Messung äquidistanter Dichten von D_{min} (Schleier) bis zu D_{max} ($2 D$ über Schleier) (Berechnung der Kompensationsparameter)
- Homogenität der Bildfeldausleuchtung über die Bildbreite.
- Signalstörabstand für drei Punkte der Kennlinie in den Farbkanälen
- Streulicht

Die Einheit aller photometrischen Daten soll mit der spektralen Charakteristik Status M bewertet werden. Da es sich bei Dichten um eine logarithmische Darstellung von photometrischen Werten handelt, soll für die Messung dieser Größen im weiteren der Begriff „Densitometrie“ verwendet werden.

Geometrisch

- Absolute Lage und Größe des grünen Bildes (Berechnung der Kompensationsparameter)
- Relative Lage des roten und blauen Bildes zu Grün (Berechnung der Kompensationsparameter)
- Horizontale und vertikale Modulationsübertragungsfunktion (MTF) in den Farbkanälen, an verschiedenen Bildorten.

Die Messung der geometrischen Lagedaten erfolgt in Millimeter, die MTF wird in Modulation für die Ortsfrequenzen bis zur Bandgrenze in Lp/mm angegeben.

2 Systembedingte und psychooptische Beschränkungen

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Leistungsmerkmale und Grenzen der digital belichteten photographischen Schicht beziehen sich auf das Original Negativ. Des weiteren darf jedoch nicht vergessen werden, dass der Belichtung eines Negatives, egal ob analog oder digital, weitere Bearbeitungsschritte folgen und somit die Qualität des Bildes beeinflusst wird. Die Betrachtung dieser Verluste leitet dieses Kapitel ein.

Anschließend beschäftigt sich Kapitel 2 mit der wohl wichtigsten Fragestellung bei der Betrachtung der Bildqualität: welche Veränderung kann vom Beobachter überhaupt wahrgenommen werden und ab wann empfindet er diese als störend.

Ziel dieses Kapitels ist, die zu erarbeitende Messmethode in einer anwendungsgerechten Weise zu dimensionieren. Denn es ist weder sinnvoll, Bildinformation über Systembeschränkungen und Wahrnehmbarkeit hinaus zu digitalisieren, noch diese zu vermessen.

N.B. In der Darstellung der Ergebnisse wird Bezug auf die MTF am Film genommen, ohne auf die verwendete Messmethodik einzugehen. Grund hierfür ist, dass die MTF-Messung als Kernstück des Messsystems sehr ausführlich in der Beschreibung der Messprozeduren (Kapitel 5.8) behandelt wird. Der Schwerpunkt in diesem Kapitel sollte jedoch rein auf der tatsächlich erreichten Schärfeleistung liegen.

2.1 Verschlechterung der MTF durch den Kopierprozess

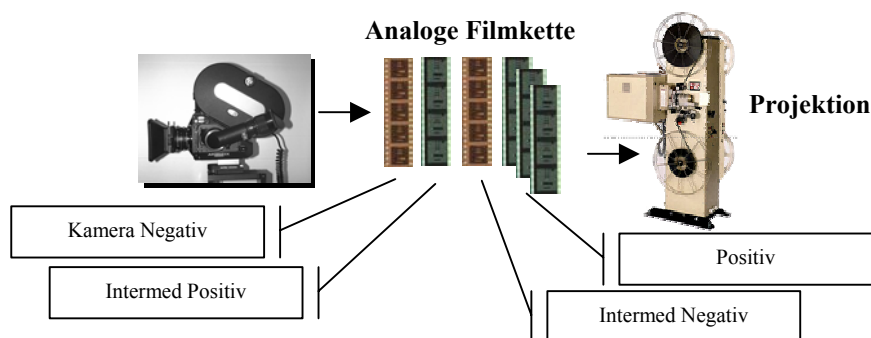


Abb.2.1.: Konventioneller Kopierwerksprozeß

Bevor das Filmbild das Auge eines Betrachters im Kino erreicht, durchläuft es in der Regel die dargestellten Kopierschritte. Weil das Kameranegativ als einziger Bildspeicher einer Filmproduktion sehr wertvoll ist, wird zunächst ein Duplikat erzeugt. Das Kameranegativ wird im Durchlicht/Kontaktverfahren auf das sogenannte Intermedpositiv übertragen, dieses in gleicher Weise auf das Intermednegativ. Vom Intermednegativ schließlich, werden die Kopien als Positiv für die Projektion hergestellt.

Wie bei jedem anderen analogen Kopierprozess, so verschlechtert sich bei jedem Schritt die Qualität der ursprünglichen Information. Während der Verlust von Dichte durch das Kopierlicht und das Übertragungsverhalten (Gamma) des Kopiermaterials ausgeglichen werden kann, ist die Verschleifung der örtlichen Information irreversibel. Um eine quantitative Aussage über diese Verschlechterung machen zu können, wurde ein Testfilm durch die Produktionskette geschleust und nach jedem Schritt vermessen.

Das objektive Kriterium der örtlichen Information (subjektiv ist davon am stärksten die Bildschärfe betroffen) ist die Modulationsübertragungsfunktion MTF.

2.1.1 MTF eines Musters bei Kopierung vom Original-Negativ



Abb.2.2.: Original Negativ und Kopie erster Generation

Die in *Abb.2.2* schematisch dargestellte erste Stufe (1. Generation) wurde mit zwei der gebräuchlichen Kopiermaschinen durchgeführt, einer optischen Step-Kopiermaschine, bei der die Übertragung Bild für Bild auf einer optischen Bank über eine Reprooptik stattfindet und mit einer kontinuierlich laufenden Kontaktkopiermaschine.

Dargestellt in *Abb.2.3*. ist das unter einem Mikroskop 100-fach vergrößerte Testraster aus der Bildmitte (Links weiße Linien auf schwarzem Grund in der Vorlage, rechts in der Kopie). Die Beschriftung im Bild gibt die jeweilige Ortsfrequenz in Linienpaaren pro mm an.

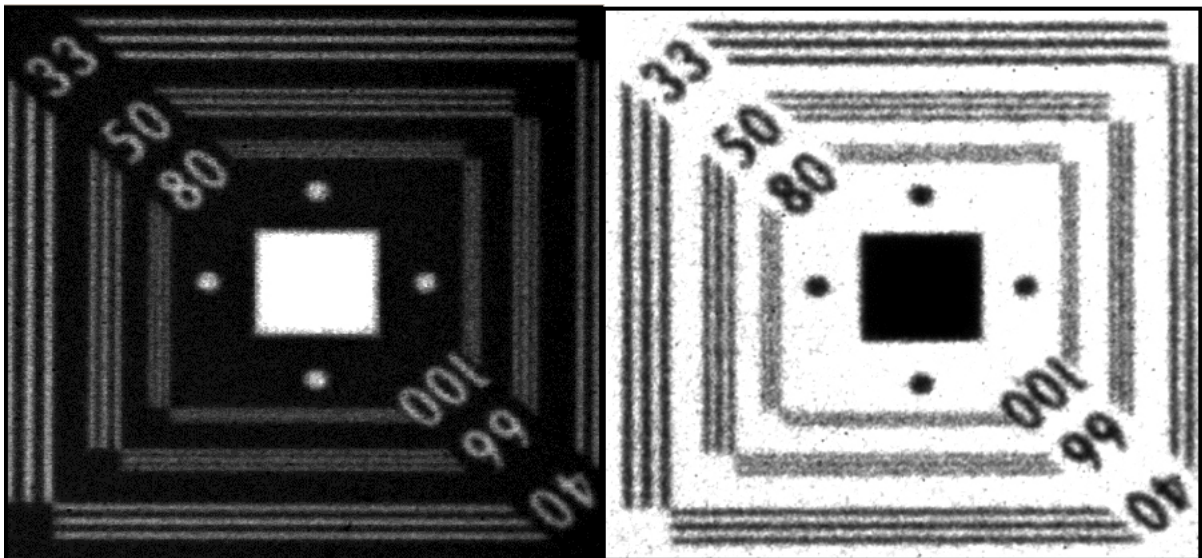


Abb.2.3.: Mikroskopbild (100-fach) links Negativ, rechts Kopie (Positiv)

Das in *Abb.2.3*. dargestellte Ergebnis der Kopie an einer Step-kopiermaschine liefert im Vergleich zu Kontaktkopierverfahren die bessere Qualität. Verwendet wird diese Technik wegen ihrer geringen Kopiergeschwindigkeit jedoch nur selten. Die maximal übertragbare horizontale und vertikale Ortsfrequenz liegt bei ca. 66 Lp/mm .

Ein B&H Mod. C Kontaktprinter (das am häufigsten verwendete System) verursacht hingegen eine Verminderung der Auflösung in Transportrichtung. Dies liegt an einer Relativbewegungen zwischen Original und Kopie während der Übertragung. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Kopiergeschwindigkeit. Lediglich bei Kodika CHK Printern (eine modifizierte Form der Mod. C) ist dieser Verlust minimiert.

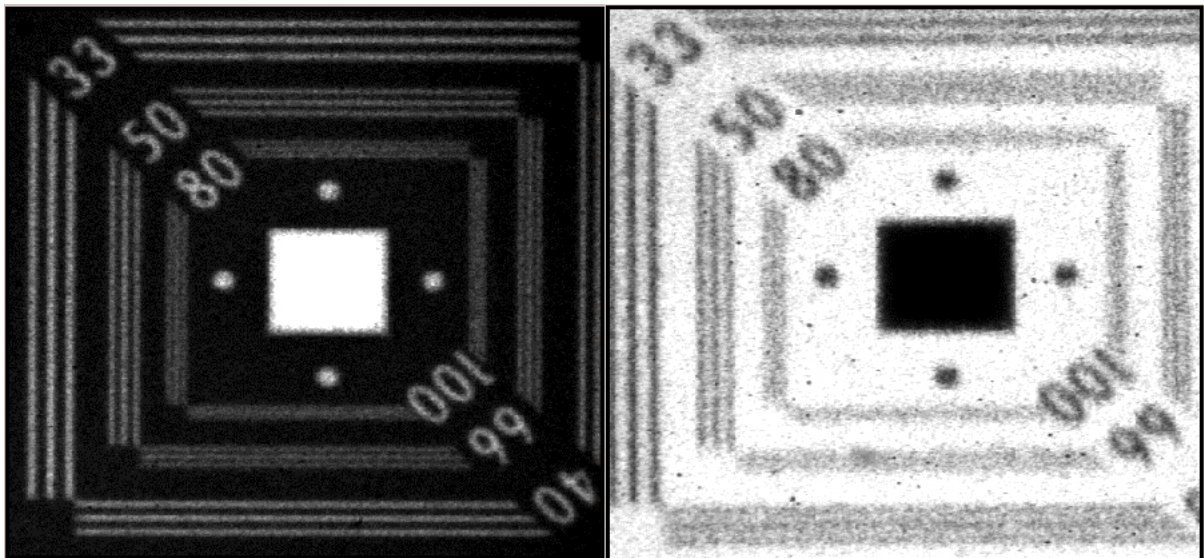


Abb.2.4.: links Negativ, rechts Kopie erstellt mit einer Kontaktkopiermaschine

Die in Abb.2.5. dargestellte maximale übertragbare vertikale Ortsfrequenz (10% MTF) liegt bei ca. 40 Lp/mm, die horizontale bei ungefähr 50 Lp/mm .

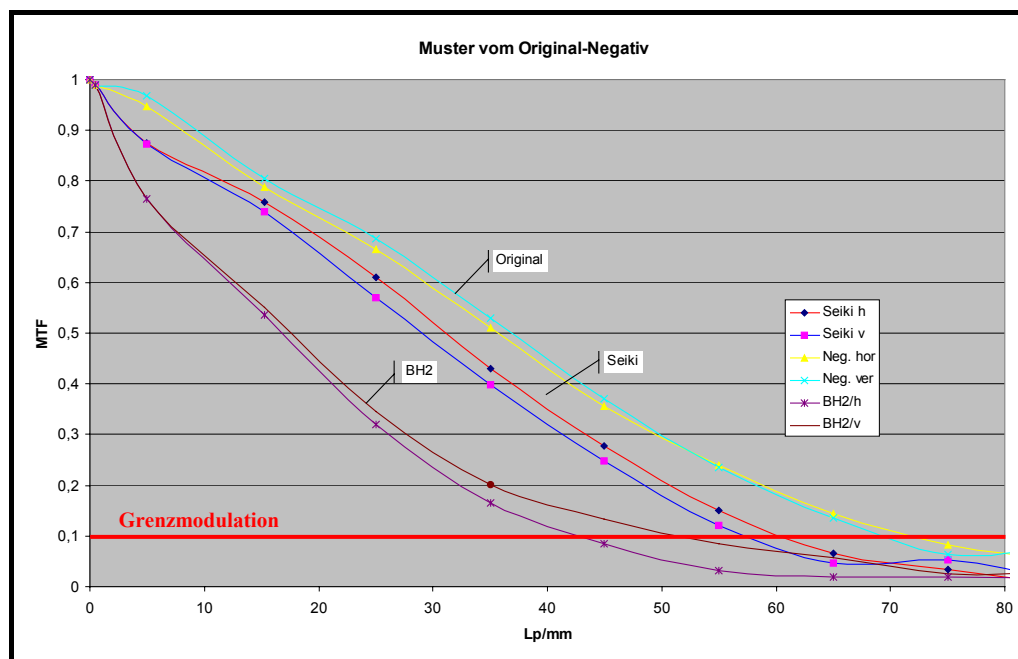


Abb.2.5.: MTF der Kopie vom Original Negativ über Step -und Kontaktkopiermaschine (BH2)

2.1.2 MTF eines Musters bei Kopierung vom Intermed-Negativ

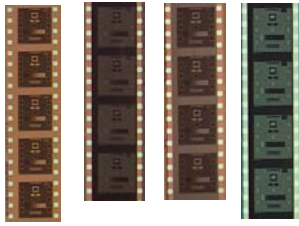


Abb.2.6.: Kopie vom Intermednegativ (4 Generation)

Ein wesentlich größerer Verlust an MTF und somit Bildschärfe entsteht bei der Kopierung über den Intermed-Prozess (Abb. 2.6.). Dies ist der Standardprozess, mit dem Kinofilm hergestellt wird.

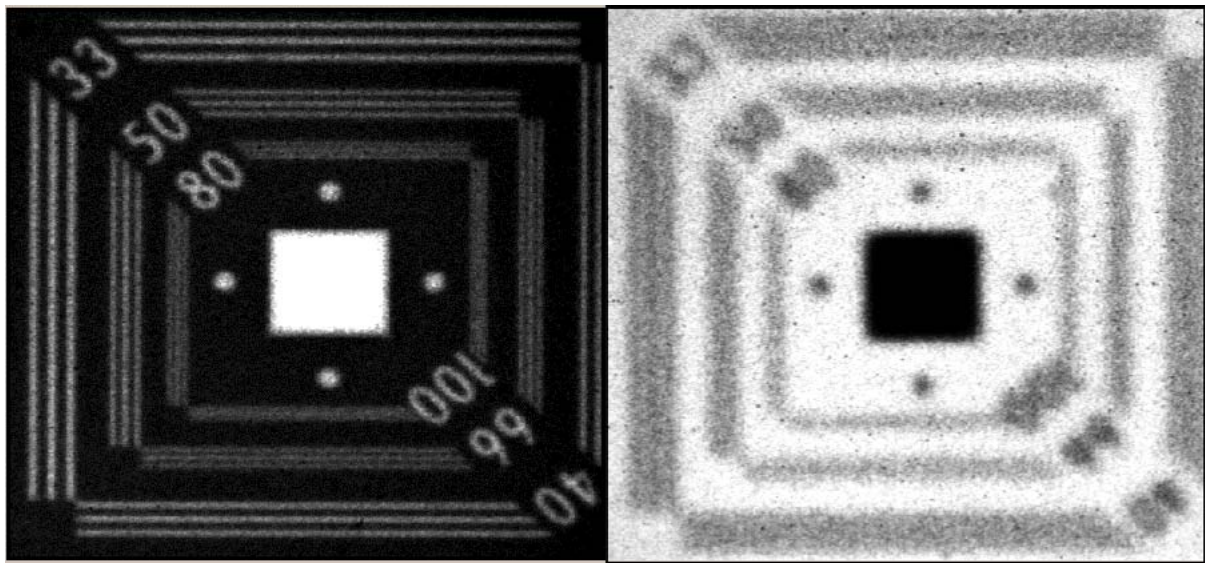


Abb.2.7.: Ausschnitt im Mikroskopbild links Negativ, rechts Kopie vom Intermed Negativ

Die in Abb.2.8. dargestellte maximale übertragbare vertikale und horizontale Ortsfrequenz (10% MTF) liegt bei ca 40 Lp/mm.

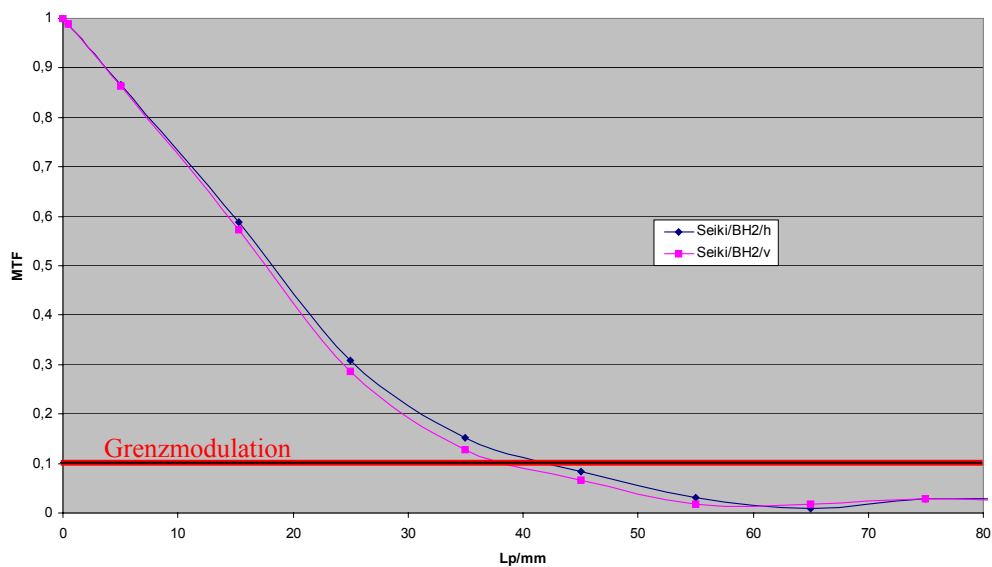


Abb.2.8.: MTF der Kopie vom Intermed Negativ (4. Generation)

Dieser Wert (40 Lp/mm) entspricht der 2K Auflösung, bei der die örtliche Information eines 35 mm Filmbildes mit $2048 * 1556$ Pixeln quantisiert wird.

Bei der Kopie vom Original Negativ ist unter günstigen Bedingungen eine maximale Ortsfrequenz von 60 Lp/mm möglich.

2.2 Auflösungsvermögen und Bildschärfe bei Betrachtung eines Kinofilmbildes

In der Fovea des menschlichen Auges befinden sich etwa 140.000 Sehzellen auf einem Quadratmillimeter, d.h. fast alle $2,5 \text{ Mikrometer}$ eine. Wenn hier zwei Bildpunkte in einem größeren Abstand als vier Mikrometer voneinander entfernt sind (das entspricht einem Objektstand von $0,2 \text{ mm}$ in 1 m Entfernung), können wir sie getrennt auflösen. Das Raster vergrößert sich zur Peripherie hin bis zu 40 -fach (Abstand 120 bis 150 Mikrometer).

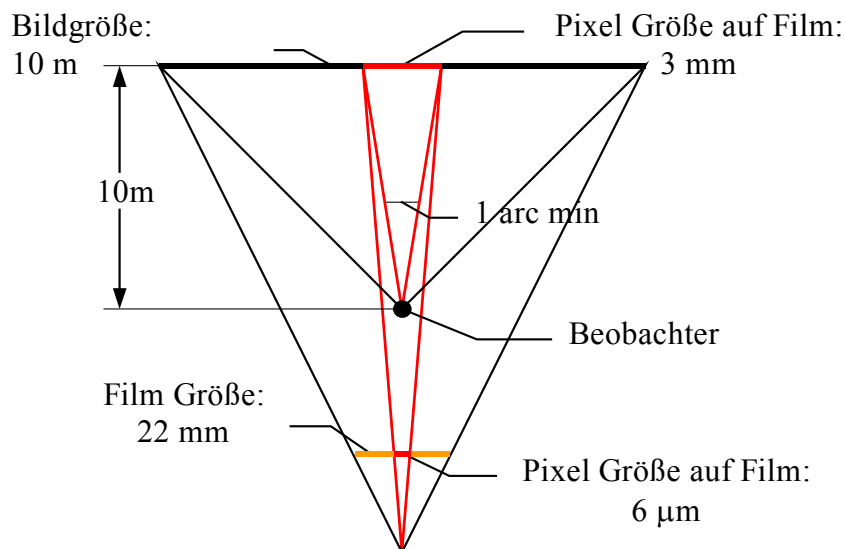


Abb.2.9.: Psychooptische Betrachtungsbedingung im Kino

Das heißt, in 1 m Entfernung müsste ein Detail am Rand des Sehfeldes ca. 4 mm groß sein, um wahrgenommen zu werden. Legt man diese Daten zu Grunde, ergibt sich daraus für einen normalsichtigen Betrachter im Kino eine minimal wahrnehmbare Objektdistanz von 3 mm im Abstand von 10 m .

Geht man nun von einer projizierten Bildbreite von ebenfalls 10 m aus, würde dies einem Objektstand von $0,006 \text{ mm}$ auf dem 35 mm Filmbild entsprechen (diese ist gleich der 4K Auflösung).

Dargestellt in Abb. 2.10. ist die Ortsauflösung bezüglich der Filmbreite, die nötig wäre um die Grenze der Wahrnehmbarkeit zu erreichen. In der ersten Reihe wären demnach 5319 Pixel für die Digitalisierung nötig in der letzten immerhin noch 2165 Pixel, dies wäre mehr als die HDTV Auflösung von 1920 Pixeln.

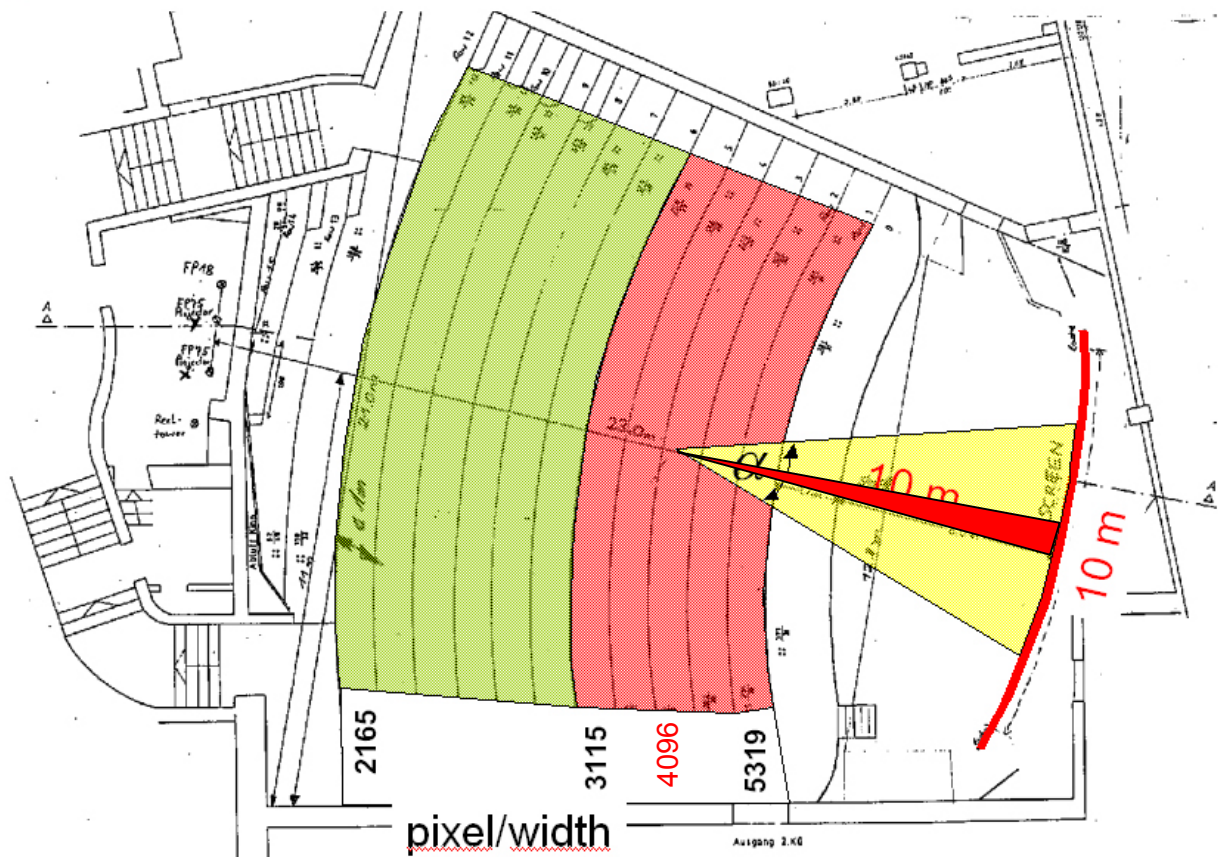


Abb.2.10.: Auflösungsgrenze für einen Betrachtungsabstand von 10 m

Diese Zusammenhänge wurde anhand eines subjektiven Versuches überprüft.

Ein Glastestbild der Firma Heidenhain mit aufgedampften Rechteckrastern wurde in die Filmbühne des Projektors eingelegt und auf die Leinwand projiziert, ebenso ein Projektionstestfilm (SMPTE RP-40). 10 Testpersonen hatten die Aufgabe, die maximal auflösbare Ortsfrequenz von der ersten bis zur letzten Reihe anzugeben. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Projektionsoptik selbst keine Beschränkung darstellt. Direkt vor der Leinwand konnte man sogar die maximale Ortsfrequenz von 150 Lp/mm noch deutlich erkennen.

Dieser Versuch stellt zwar eine starke Idealisierung der Projektionsbedingung dar, denn bei der realen Betrachtung handelt es sich schließlich um bewegte Bilder (mit niedrigerem Kontrast), für die bei der Wahrnehmung ein deutlich reduziertes Auflösungsvermögen zu erwarten ist, er bestätigte jedoch in guter Näherung die theoretische Erwartung. In nachstehender Tabelle ist die berechnete und die im Versuch bestimmte mittlere Auflösungsgrenze des Auges in Abhängigkeit des Betrachtungsabstandes dargestellt. Die Spalte Heidenhain enthält die gerade noch erkennbaren Ortsfrequenzen des statischen Glastestbildes, die Spalte RP 40 die entsprechenden Ortsfrequenzen bei der Projektion des laufenden Testfilmes RP40.

		Auflösungsgrenze theoretisch		Praktisch Lp/mm	
Abstand Leinwand / mm		Δx in mm	Lp/mm	Heidenhain	RP 40
Bühne	1000	0,2	875		
Bühne	2000	0,4	438		
Bühne	5000	1	175		
Bühne	6000	1,2	146		
Reihe 1	7000	1,4	125	90,5 *	80 *
Reihe 2	8000	1,6	109		
Reihe 3	9000	1,8	97		
Reihe 4	10000	2	88		
Reihe 5	11000	2,2	80		
Reihe 6	12000	2,4	73		
Reihe 7	13000	2,6	67		
Reihe 8	14000	2,8	63		
Reihe 9	15000	3	58		
Reihe 10	16000	3,2	55	56 *	
Reihe 11	17000	3,4	51		
Reihe 12	18000	3,6	49		
Gang	19000	3,8	46	* Diese Werte wurden durch subjektive Test's ermittelt	
Reihe 13	20000	4	44		
Reihe 14	21000	4,2	42		
Reihe 15	22000	4,4	40	40,3 *	40 *
Vorführer	23000	4,6	38		

Das menschliche Auge ist also in der Lage die $4K$ Auflösung ($80 Lp/mm$) bis weit über die Mitte eines durchschnittlichen Kinosaaes wahrzunehmen.

Wie in Kapitel 1 erwähnt, sagt die Auflösungsgrenze alleine jedoch noch nichts über die subjektive Schärfeempfindung aus. Ein weiterer Versuch sollte daher Aufschluss über die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Bildschärfe geben, bzw darüber, ab welcher Veränderung eine „Unschärfe“ im Bild als unzumutbar empfunden wird.

Für diesen Versuch war zunächst ein Verfahren nötig, mit dem man die optimale Bildschärfe einer realen Filmszene gezielt in Schritten verändern konnte. Dies konnte durch den ARRILASER realisiert werden.

Sukzessive Defokussierung einer realen Filmszene

Im Scannermodul des Laserrecorders wird der vereinigte, divergente (*RGB*) Strahl durch eine Kollimatoroptik in einen Parallelstrahl umgewandelt, der durch das F-Theta Objektiv auf die Filmebene fokussiert wird. Die F-Theta Optik ist ortsfest und verfügt über keine Fokussiereinrichtung. Die einzige Möglichkeit, die Spotgröße in der Filmebene und somit die Bildschärfe zu beeinflussen, ist die Veränderung des Parallelstrahles durch Verschiebung des Kollimators wie in *Abb.2.11*. dargestellt, das heißt aus dem idealerweise parallelen Strahlenbündel wird je nach Verschiebungsrichtung ein leicht divergentes oder konvergentes Bündel, das dann durch die F-Theta Optik den Brennpunkt unter oder über der Filmebene abbildet ; das Bild wird unscharf. Ausgehend von der Nullage (Brennpunkt liegt in der Filmebene) wurde der Kollimator mit Hilfe von Endmaßen in 0,7 mm Schritten verschoben. Für jede dieser neun Stufen wurde subjektives und objektives Testmaterial belichtet.

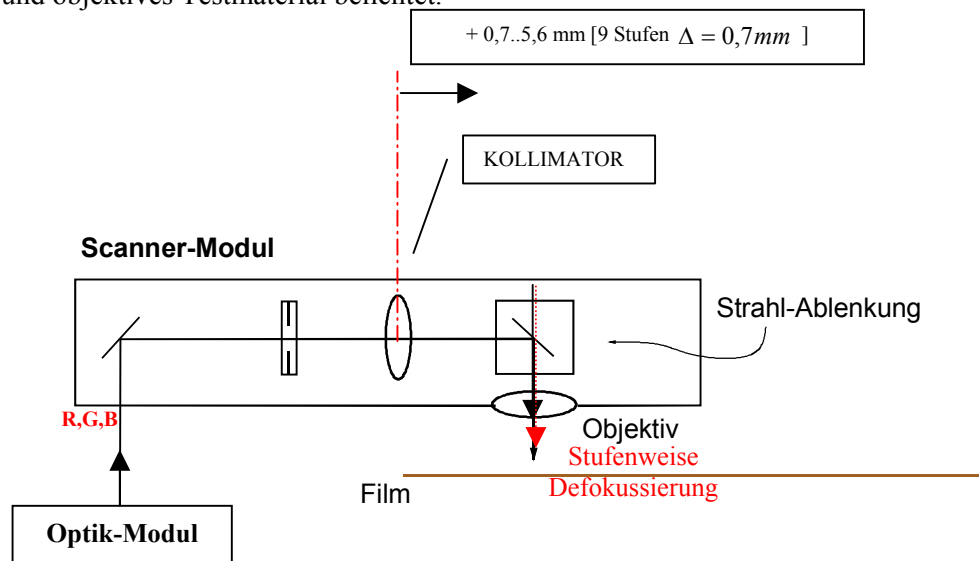


Abb.2.11.: Prinzip der stufenweisen Defokussierung am ARRILASER

2.2.1 Herstellung eines subjektiven Testfilms

Aus einem Kurzfilm wurden 15 Sekunden (375 Einzelbilder) mit einer Portrait-Einstellung und einer kurzen Bewegungsphase ausgewählt und in *2K* Auflösung ($2048 * 1556$ Pixel) gescannt. Verwendet wurde - wie in der digitalen Filmbearbeitung üblich - das Original-Kameranegativ.



Abb.2.12.: Systematischer Ablauf der subjektiven Testfilmerstellung

Die Daten wurden sodann im ARRILASER mit einem *4K* Spot ($0,006 \text{ mm}$) neunmal hintereinander ausbelichtet, das Negativ anschließend wieder in die Startposition zurückgefahren. Da es sich um *2K* Daten handelt, die man normalerweise auch mit einem *2K* Spot ($0,012 \text{ mm}$) belichtet, wurde nur die Hälfte der Filmfläche verwendet.



Abb.2.13.: links wird die ideal fokussierte Szene belichtet

Die rechte Hälfte konnte nun mit der sukzessive defokussierten Szene belichtet werden.

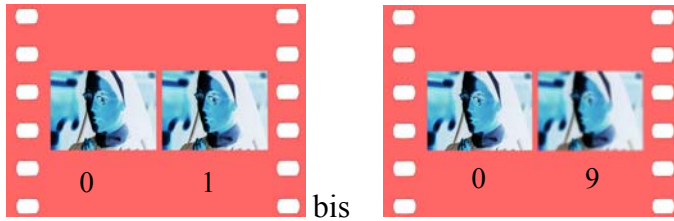


Abb.2.14.: rechts defokussierte Szene

Das fertig belichtete Negativ wurde schließlich im Kontaktverfahren auf Printfilm umkopiert,

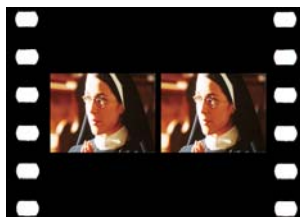


Abb.2.15.: Kopie des Testfilms

und 50 Testpersonen im Kino vorgeführt.

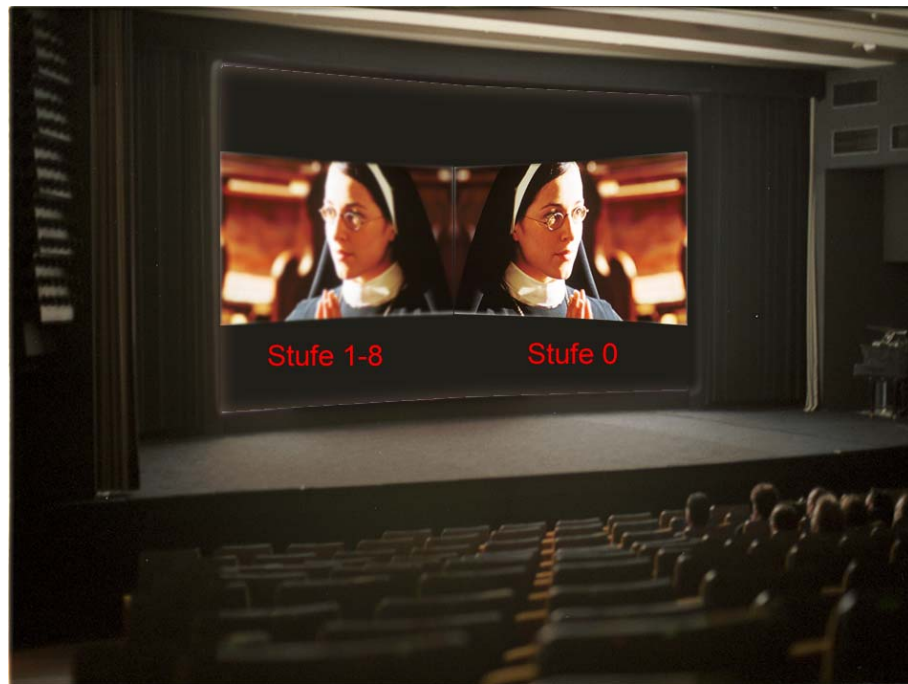


Abb.2.16.: Projektion im ARRI Kino

Die Befragten sollten zwei Antworten geben:

1. Ab welcher Stufe bemerken Sie einen Unterschied zwischen der linken und der rechten Seite.
2. Ab welcher Stufe würden Sie die Bildqualität als unzumutbar beurteilen.

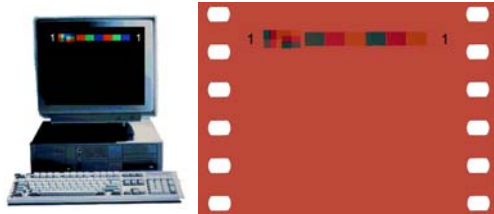
Die Auswertung ergab folgendes Ergebnis:

1. Der Schwellwert wurde von 87 % bei Stufe 3 erkannt.
2. Die „Unzumutbar-Grenze“ lag mit 75 % bei Stufe 5.

Nachdem der subjektive Schwell- und Ablehnungswert bekannt war, musste für diese Stufen die Veränderung der MTF gemessen werden.

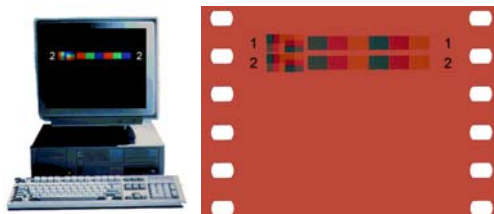
2.2.2 Herstellung eines objektiven Testfilms zur Messung der MTF

Auch hier wurden mit Hilfe der Mehrfachbelichtung acht digital erzeugte Testmuster in den acht Defokussierungsstufen auf ein Filmbild belichtet. Dargestellt in *Abb. 2.17. – 2.19.* ist der zeitliche Ablauf der Belichtung und der stufenweise entstehende Bildinhalt durch die Mehrfachbelichtung.



➤ Anschließend Film-Rücktransport

Abb.2.17.: Belichtung Stufe 1 [Nullpkt.], Defokussierung



➤ Anschließend Film-Rücktransport

Abb.2.18.: Belichtung Stufe 2, Defokussierung

Zur Belichtung der Defokussierungsstufen 3-7 wurde der in *Abb. 2.18.* dargestellte Weg wiederholt.

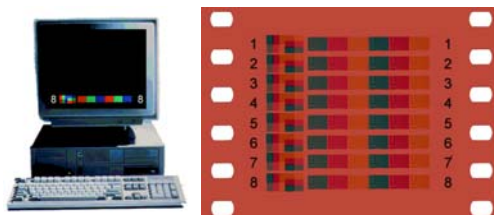


Abb.2.19.: Belichtung Stufe 8

Das so belichtete Testbild wurde anschließend entwickelt und die MTF's der Stufen 1-8 vermessen.

Die Bandbegrenzung der Belichtung mit optimaler Schärfe ist durch den $2K$ Spot des Laserstrahles gegeben, dieser beträgt $0,012\text{ mm}$.

Dargestellt in *Abb.2.20.* ist eine Mittelung der horizontalen und vertikalen MTF für die grüne Farbschicht des Negatives (der Einfluß des Messmittels wurde gemessen und rechnerisch kompensiert). Die Komprimierung der Daten ist im Hinblick auf die spektrale Empfindlichkeit ($V(\lambda)$) des menschlichen Auges zulässig, das seine maximale Sehschärfe im Bereich von 555 nm (grün) erreicht [*L2.1*].

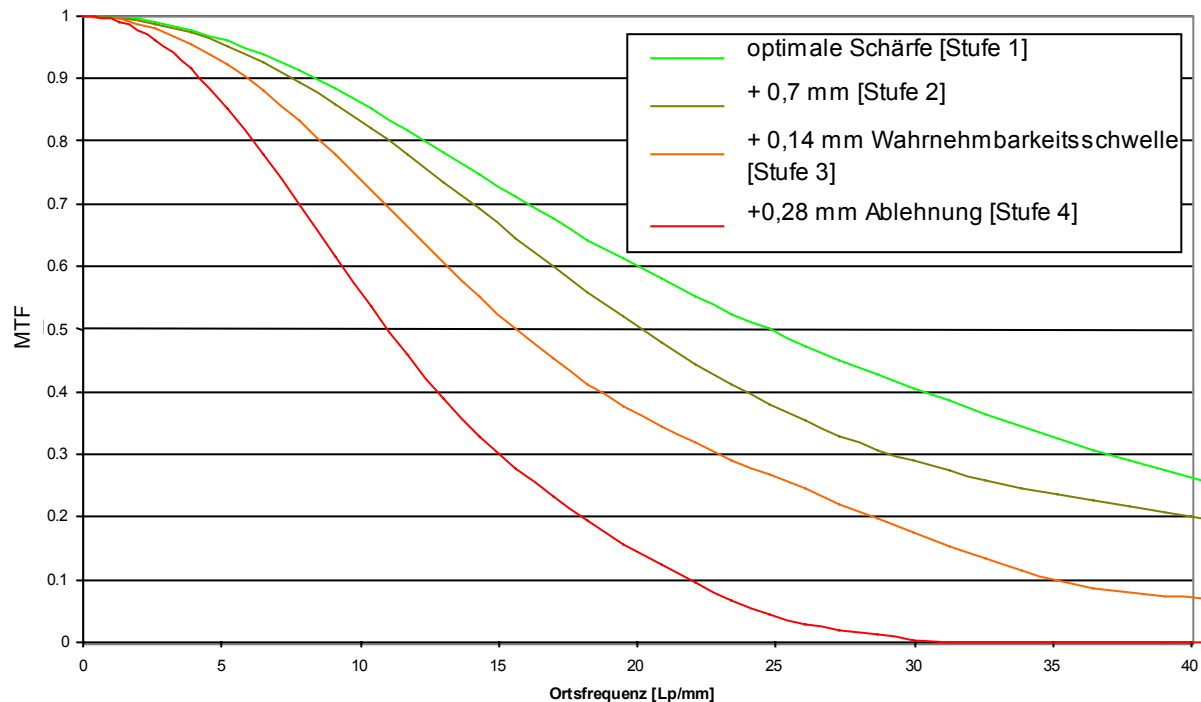


Abb.2.20.: MTF der Fokusstufen am Negativ

2.3 Fazit

Ein weit verbreitetes Gerücht in der Filmbranche ist, dass die ursprünglich gute Auflösung des Filmbildes durch die Projektion verschlechtert wird. Wahr ist, dass im Kopierprozess die Hauptursache des Informationsverlustes zu suchen ist. Von einer $4K$ Auflösung (80 Lp/mm) können maximal $2K$ (40 Lp/mm) übertragen werden.

Obwohl das menschliche Auge in der Lage wäre, eine $4K$ Auflösung bis zu einer Entfernung von 10 m zu erkennen, scheint es selbst bei einer direkten Vergleichsmöglichkeit relativ unkritisch auf eine Verunschärfung zu reagieren.

Für eine reale Kinoprojektion, bei der ja diese direkte Vergleichsmöglichkeit fehlt, dürfte Schwell- und Ablehnungswert sogar noch höher liegen.

Eine wichtige Aussage der Messung: die MTF ist ein „Instrument“ mit ausreichender Sensibilität, um Schärfe objektiv zu erfassen.

Für die Anforderungen an das Messsystem fassen sich diese Erkenntnisse wie folgt zusammen:

1. Ortsfrequenzen über 40 Lp/mm können bei einer Qualitätsbeurteilung der Schärfe unberücksichtigt bleiben. Eine Quantisierung des zu analysierenden Bildes muss nach dem Abtasttheorem mindestens mit der doppelten maximalen Ortsfrequenz geschehen, also mit 80 Lp/mm oder einer Auflösung von $4K$.
2. Die gefundenen Schwellwerte der MTF geben in guter Näherung ein objektives Grenzwertkriterium für die Beurteilung der gemessenen Bildschärfe.

3 Aufbau des Messsystems

Das nun folgende Kapitel beschreibt den systematischen Aufbau des Messsystems. Ziel dieses Abschnitts ist es, in knapper Form ein prinzipielles Verständnis für den Ablauf der Analyse herzustellen. Die geometrischen und photometrischen Daten des Testbildaufbaus sind im Anhang zu finden.

3.1 Prinzipieller Ablauf

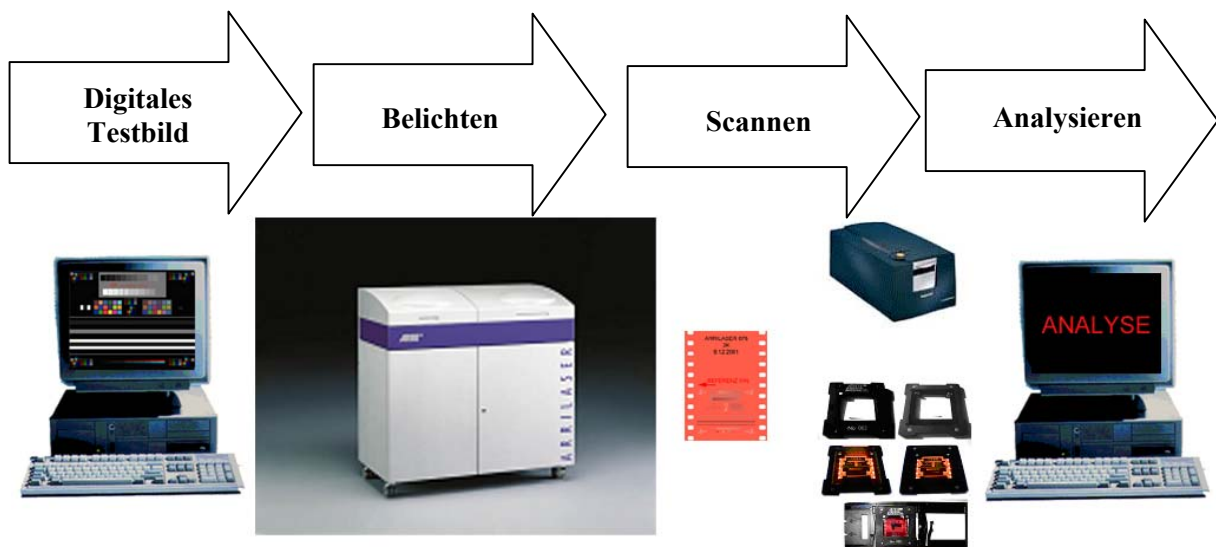


Abb.3.1.: Analyseablauf

Ausgangspunkt des Analysesystems ist ein einziges, digital generiertes Testbild, das vom Laserrecorder ausbelichtet wird. Es enthält alle Testmuster die zur Bestimmung der statischen Bildgüteparameter nötig sind. Diese sind so gewählt, dass sie sowohl subjektiv, als auch von den Werkzeugen der digitalen Bildverarbeitung optimal verwertet werden können. Das auf Kodak 5242 Intermed-Negativ belichtete und entwickelte Testbild wird zusammen mit einer Halterung, die Referenzmuster enthält, gescannt und mit einer dafür entwickelten Software analysiert und protokolliert.

3.2 Aufbau des Universaltestbildes

Alle vom Recorder erzeugbaren geometrischen Bildformate, basieren auf Laser-Spotgrößen, die von zwei Kollimatoren stammen. Die Überprüfung aller Formate lässt sich demnach auf zwei Testbilder mit den Auflösungen

4096 * 3112 Pixel zum Test der 4K Belichtung (0,006 mm Spotgröße)

2048 * 1556 Pixel zum Test der 2K Belichtung (0,012 mm Spotgröße)

reduzieren. Weil Position, Größe und Inhalt beider Testbilder am Film ebenso identisch sind, wie das Vorgehen bei der Messung, lässt sich die Erklärung der Testbildstruktur und des Ablaufes an Hand einer Auflösung (hier 4K) durchführen.

Die Farbtiefe der Testbilder entspricht dem *10 Bit* Cineon Format, das vom Laserrecorder ausschließlich verarbeitet wird (*Abb. 1.2.*).

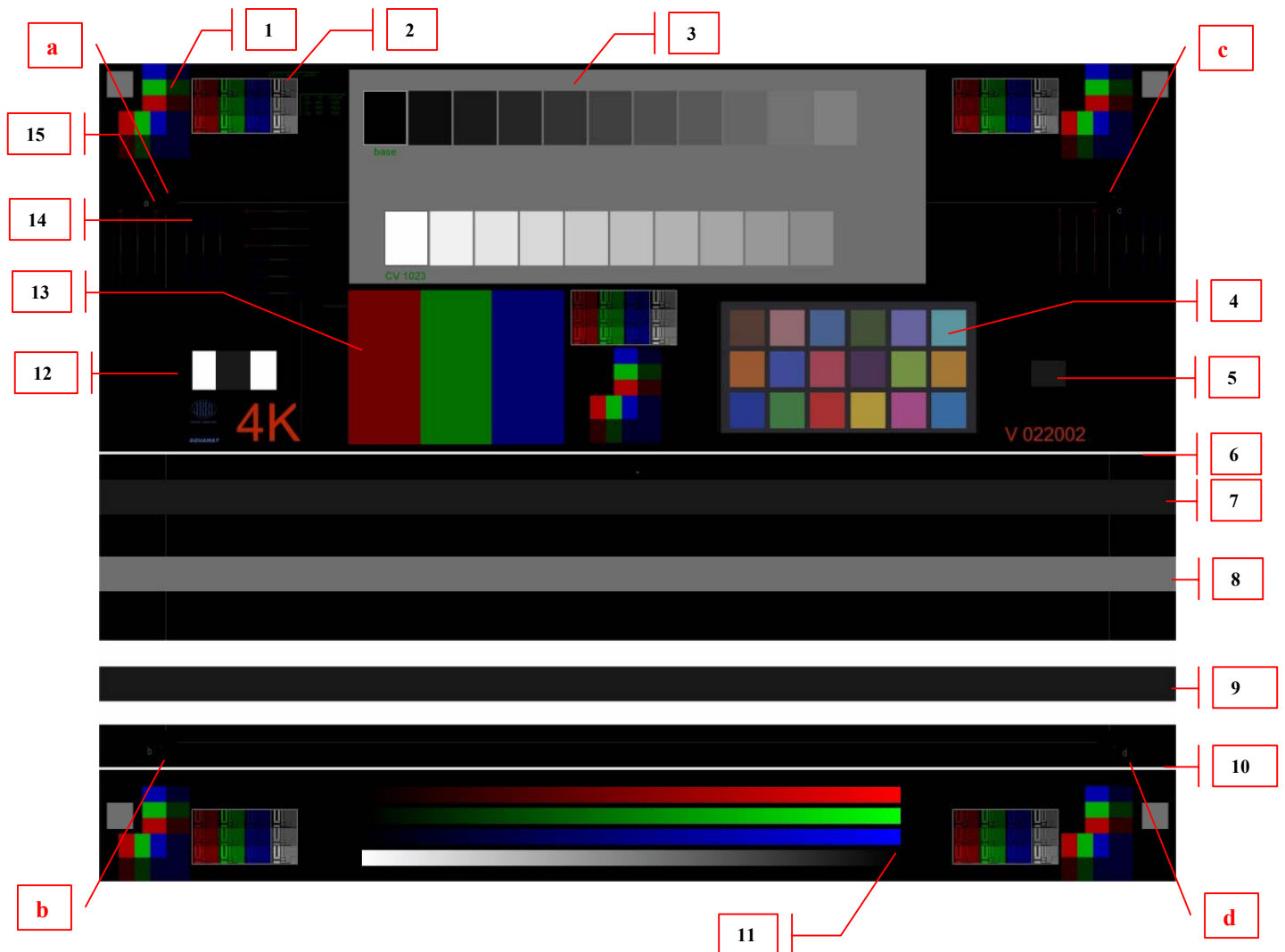


Abb.3.2.: Universaltestbild

Die Beschreibung der einzelnen Testbildpositionen folgt im nächsten Abschnitt.

Pos. 1 MTF

Gemessen wird ein vertikaler bzw. horizontaler Kantenschnitt für *RGB* getrennt. Diese Trennung geschieht zur eindeutigen, also von der Scannerfarbtrennung unabhängigen, Bewertung der optischen Übertragungsfunktionen (MTF) der drei Laser.

Die MTF lässt sich aus der komplexen Fouriertransformation des Linienbildes der Kantenschnitte berechnen (Kapitel 5.8).

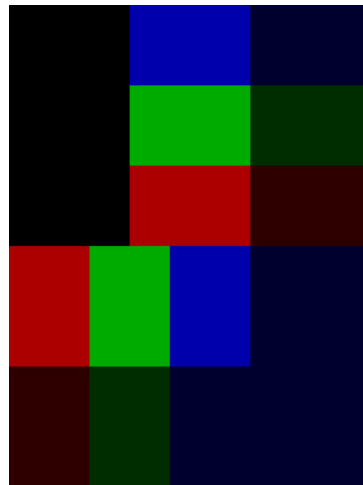


Abb.3.3.: Kanten für die Auflösungsmessung

Pos. 2 Auflösung

Zur Bewertung der subjektiven Auflösung werden horizontale und vertikale Rechteckraster mit unterschiedlicher Eingangsmodulation in *RGB* getrennt und als kombiniertes Muster verwendet.

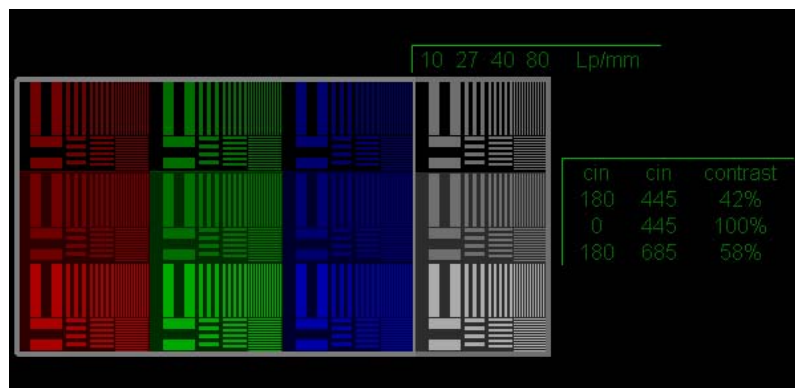


Abb.3.4.: Rechteckraster für die subjektive Auflösungsbeurteilung

Pos. 3 Kennlinie

Für die Kalibrierungsmessung kommt ein 21-stufiger, äquidistanter Graukeil zum Einsatz. Die Zielkennlinie ist dabei vom Recorderbenutzer frei wählbar. Das Umfeld des Graukeils ist zur Verminderung von Streulichteinflüssen beim Scannen mit einem mittleren Grau (444,444,444) vorbelichtet. Die Fläche des Umfeldes wird zusätzlich für die Signalstörabstand-Berechnung (Position 14) verwendet.

Pos. 4 Farbraumumwandlung

Subjektive Referenz für die Farbwiedergabe und Grundlage zur Berechnung der angenäherten Farbraumumwandlung von Scannerdichten in Status M Dichten. Die Farbfelder entsprechen in ihren Farborten (am Film) einem in der Farbmessstechnik weit verbreiteten Standard Testbild, dem Macbeth Colorchecker.

Pos. 5, 6, 7, 9, 11, 12 Streulicht

Pos. 5, 7, 9, 12

Bestimmung des Streulichtverhaltens in vertikaler (Pos. 6, 12) und horizontaler (Pos. 7, 8, 10) Richtung. Es werden ein vertikaler und ein horizontaler Schnitt verglichen. In einem Fall ohne Belichtung im direkten Umfeld, im Anderen mit einem Umfeld maximaler Belichtung.

Pos. 6, 11 Horizontale Balken mit maximaler Belichtung (1023,1023,1023)

Sie dienen zur subjektiven Auffindung von Streulichtartefakten, erzeugt durch optische Komponenten im vereinigten Strahlengang (Abb.E.3). Diese Artefakte sind an Orten maximaler Belichtung besonders deutlich zu erkennen und reproduzieren sich für alle Bildhöhen.

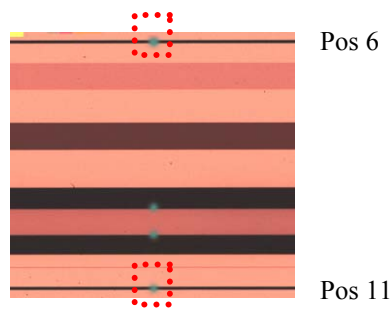


Abb.3.5.: Streulichtartefakt

Pos. 8 Homogenität der Belichtung

Gemessen wird diese in Status M Dichte für R, G, B entlang der Bildbreite, gemittelt über 20 Zeilen. Das Grau des Balkens erzeugt mit den RGB -Bitwerten 444,444,444 eine Dichte von 0,88 über Schleier.

Pos. 10 Kennlinie der AOM's

„Stufenloser“ ($\Delta StatM_{RGB} = 0,002 = \Delta CineonCV = 1$) R, G, B Gradient zur Überprüfung der Ansteuerung der drei AOM's (Akusto Optischen Modulatoren). Dieses Testmuster erlaubt eine vollständige Überprüfung der Zuordnung zwischen Lichtmenge und Grauwert von 0 bis 1023 in R, G, B .

Pos. 14 Konstante R, G, B Flächen zur Berechnung des Signalstörabstandes

Diese Flächen werden mit einem mittleren Belichtungswert von $CV 444$ für jede Farbe belichtet. Es werden über $34 * 73$ Flächen von je $8 * 8$ Pixel die mittleren Signalwerte und die Abweichungsquadrate berechnet; daraus lassen sich die RMS und der Störabstand ableiten.

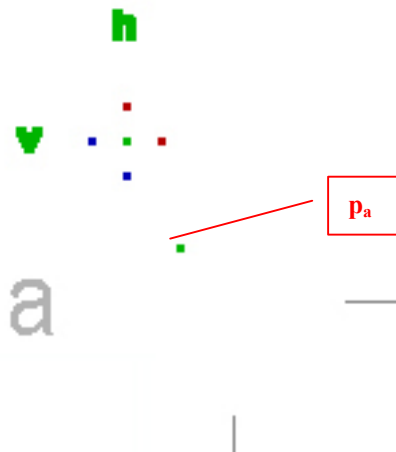


Abb.3.6.: Passpunkt und Konvergenztestmuster

Für die Überprüfung der geometrischen Lageparameter werden an vier Stellen in *Abb. 3.2.* (Pos. a,b,c,d) einfarbige Passpunkte angebracht. Für die Farbe der Passpunkte wurde Grün gewählt, weil die Filmbelichtung hier in Verbindung mit dem verwendeten Laser die höchste örtliche Auflösung besitzt; außerdem ist ein monochromer Passpunkt für die automatische Objekterkennung von Vorteil - eine klare Separierung zwischen Pass- und Referenzpunkten wird so erleichtert. p_a , p_c markieren den Bildanfang und das Bildende in x und y; aus ihnen berechnet sich die Bildbreite und die Rotation. Die in Kreuzform über p_a und p_c angeordneten Passpunkte dienen zur Bestimmung des Konvergenzfehlers, in horizontaler und vertikaler Richtung relativ zu Grün, am Bildanfang und am Bildende.

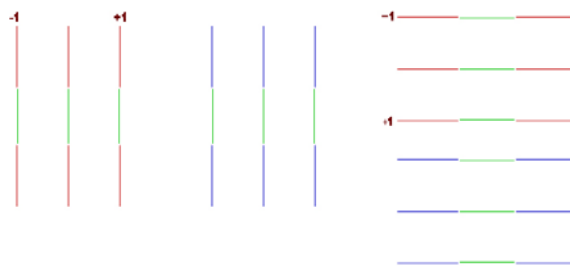


Abb.3.7.: subjektives Konvergenztestmuster

Das dargestellte Testmuster (Abb. 3.7.) ermöglicht die subjektive Beurteilung der horizontalen und vertikalen Konvergenz bei Position a und c. Beurteilt wird die relative Verschiebung zu Grün in beiden Richtungen. Die übereinander liegenden Testlinien machen sich das erhöhte räumliche Auflösungsvermögen (Noniussehschärfe) des menschlichen Auges für solche Anordnungen zu Nutze. Infolge des mosaikartigen Aufbaus der Netzhaut kann aus einem Abstand von 1 m eine Parallelversetzung zweier dünner Linien von $0,02\text{ mm}$ wahrgenommen werden [L3.1]. Das entspricht dem 10-fachen der „normalen“ Auflösungsgrenze. (Abb. 2.9.) Die mit +1 und -1 gekennzeichneten Muster besitzen einen „Offset“ von einem Pixel und erleichtern die subjektive Identifizierung der Richtung und der Größe des Konvergenzfehlers. Dieses Testmuster ist aus der Druckindustrie entlehnt; dort wird es z.B. verwendet, um die Justage von Tintenstrahldruckköpfen zu überprüfen.

3.3 Belichten des Testbildes

Das Testbild wird vom Laserrecorder als fester Vorspann ausbelichtet und entwickelt. Zusätzlich wird automatisch ein Bild generiert das die Seriennummer des Gerätes und diverse Metadaten enthält.



Abb.3.8.: Vorspann mit Metadaten

3.4 Scannen des Testbildes

Das Testbild soll nun von einem Scanner zur Analyse digitalisiert werden. Zum Einsatz kommt ein Kleinbild Filmscanner der Fa. Polaroid (Modell SprintsScan 4000) aus dem photographischen Konsumerbereich.

3.4.1 Funktionsweise eines Zeilenscanners

Ein Scanner tastet Vorlagen mit lichtempfindlichen Sensoren ab und wandelt die daraus gewonnenen Signale in digitale Daten um, die dann in den Computer übernommen und dort verarbeitet werden können. Dazu zerlegt er die Vorlage in eine Matrix von Bildelementen (Pixel) und sendet für jedes Pixel die Information über die Helligkeit (und im Falle eines Farbscans über die Farbe) an den Computer.

Für das Erzeugen eines Farbbildes sind pro Bildpunkt Helligkeitsinformationen in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau notwendig. Die meisten modernen Scanner arbeiten mit der Single-Pass-Technologie, bei der in einem einzigen Durchgang alle notwendigen Daten erfasst werden. Diese Scanner sind mit sogenannten *trilinearen* Sensoren ausgerüstet. Dies sind Zeilensensoren, die aus drei parallelen Scanzeilen bestehen, wobei je eine Zeile mit einem Rot-, einem Grün- bzw. einem Blaufilter bestückt ist.

3.4.2 Die Scan-Auflösung

Als *Scan-Auflösung* wird die Anzahl Bildelemente pro Längeneinheit bezeichnet, mit der eine Vorlage erfasst wird, eine Einheit, die aus der Welt der Drucker kommt. Die optische Auflösung wird durch die Anzahl der mit CCD-Zeilen tatsächlich erfassten Messwerte pro Inch und durch das optische System bestimmt. Eine lineare Scanzeile besteht aus einer Reihe von lichtempfindlichen Elementen. Die Anzahl der Punkte pro Zeile ist für die Auflösung des Gerätes in einer Richtung bestimmend: je mehr Bildpunkte auf eine bestimmte Länge passen, desto feiner oder höher ist die Auflösung. In der Scanrichtung ist die Genauigkeit des Schrittmotors für die Auflösung bestimmend – je kleiner die Distanz zwischen zwei Positionen ist, desto höher ist die Auflösung in Scanrichtung.

Grenzauflösung

Der Sprint Scan 4000 verfügt über eine optische Auflösung von 4000 dpi, daraus berechnet sich ein Pixelsabstand in mm:

$$\frac{4000 \text{ dots}}{25,4 \text{ mm}} = 157 \frac{\text{dots}}{\text{mm}} = \frac{1}{157} = 0,006 \text{ mm} \quad \text{Pixelabstand} \quad (3.1)$$

dies entspricht einer Ortsfrequenz von

$$\frac{1}{2 * 0,006} \text{ mm} = \frac{1}{0,012} \text{ mm} = 83,3 \text{ Lp / mm} \quad (3.2)$$

also der in Kapitel 1 [1.5 Seite 18] geforderten doppelten Abtastfrequenz von 80 Lp/mm.

3.4.3 Dichteumfang und Maximaldichte

Der Scanner wendet eine automatische Dichteregulierung an, um bestimmte Einstellungen für Vorlagen unterschiedlicher Dichte automatisch zu berechnen, bevor der eigentliche Scan erfolgt. Die minimale Dichte und die maximale Dichte werden automatisch lokalisiert. Die bei der digitalen Filmbelichtung erzielte Status-M-Maximaldichte über Schleier (*Abb. 1.3*) liegen bei :

	<i>ROT</i>	<i>GRÜN</i>	<i>BLAU</i>
<i>D_{max}</i>	2,10	2,67	2,73

Vom Scannerhersteller wird eine maximale Dichte von Status M 3,0 über Schleierdichte in allen Kanälen angegeben. Die Überprüfung dieser Werte findet gleichzeitig mit der Messung der Linearität in Kapitel 4.2.1.1 statt.

3.4.4 Farbtiefe

Die Spannung, die von einem CCD-Element ausgeht, wird von einem Analog/Digital-Wandler in digitale Werte umgesetzt. Vom A/D-Wandler hängt es ab, mit welcher Feinheit Helligkeitsunterschiede differenziert werden können. Wie in Kapitel 1 beschrieben, wird das digitale Bild im Cineonformat ausbelichtet, das heisst mit einer Quantisierung von *10 bit* (1 in 1024).

Der A/D Umsetzer des Analysescanners liefert eine Farbauflösung von *12 bit* pro Kanal, diese wird linear nach *16 bit* gewandelt und im Tiff- Format gespeichert.

3.5 Filmhalterung mit Referenzmarken

Kernstück des Systems ist eine mechanische Filmhalterung, deren Aufbau und Funktion im weiteren beschrieben werden soll. Sie dient dazu, die Probe geometrisch referenziert für den Scanvorgang zu fixieren.

Herkömmlich ermittelt man die Größe und Lage eines Bildes, mit einem Messmikroskop, durch Bestimmung der Abstände der Perfolochmitte (des linken oberen Perfoloches) zu den vier belichteten Eckpunkten.

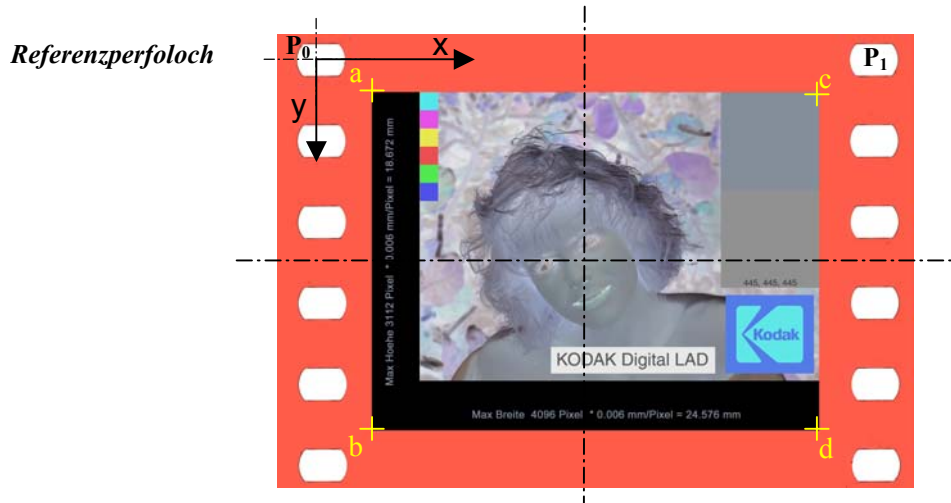


Abb.3.9.: Koordinatensystem

Bei der „digitalen Version“ der Geometriemessung müsste man also die Perforation mitscannen, um eine definierte Referenz zu erhalten. Erste Versuche in diese Richtung, mit dem Ziel, die Scannersoftware so zu kalibrieren, dass die Positionsmessung direkt durch Umrechnung von Pixelwerten möglich wäre, scheiterten an nicht reproduzierbaren Schwankungen des Scannervorschubes. Diese lagen in einer Größenordnung von bis zu 1,5 %. $0,25 \text{ mm}$ (44 Pixel) auf die volle Bildhöhe von $18,67 \text{ mm}$.

Der Ansatz, ein Referenzgitter auf Glas mit zu scannen, stellte sich zwar prinzipiell als realisierbar heraus, beeinflusste jedoch die Verarbeitungszeit des eigentlichen Analyseablaufes immens.

Als praktikierbar stellte sich folgende Lösung heraus:

Bei der Belichtung wird der Film über zwei gegenüber liegende Perforationslöcher P_0 und P_1 registriert; dies geschieht mit Hilfe zweier hochgenauer Passstifte, den sogenannten Sperrgreifern. Die absolute Lage des Bildes leitet sich somit relativ zur Mitte des linken Sperrgreifers P_0 ab. Verwendet man nun für den Scanvorgang eine Bildhalterung, die den Film wie bei der Belichtung registriert, läßt sich die Lage des idealen Eckpunktes über eine auf ein Deckglas aufgedampfte Referenz markieren.

Von POG (Präzisions Optik Gera) wurde dieses Deckglas (Abb.3.10.) gefertigt. Die Strukturen aus Chromoxid wurden lithographisch hergestellt, mit einer optischen Dichte von $4,0$.

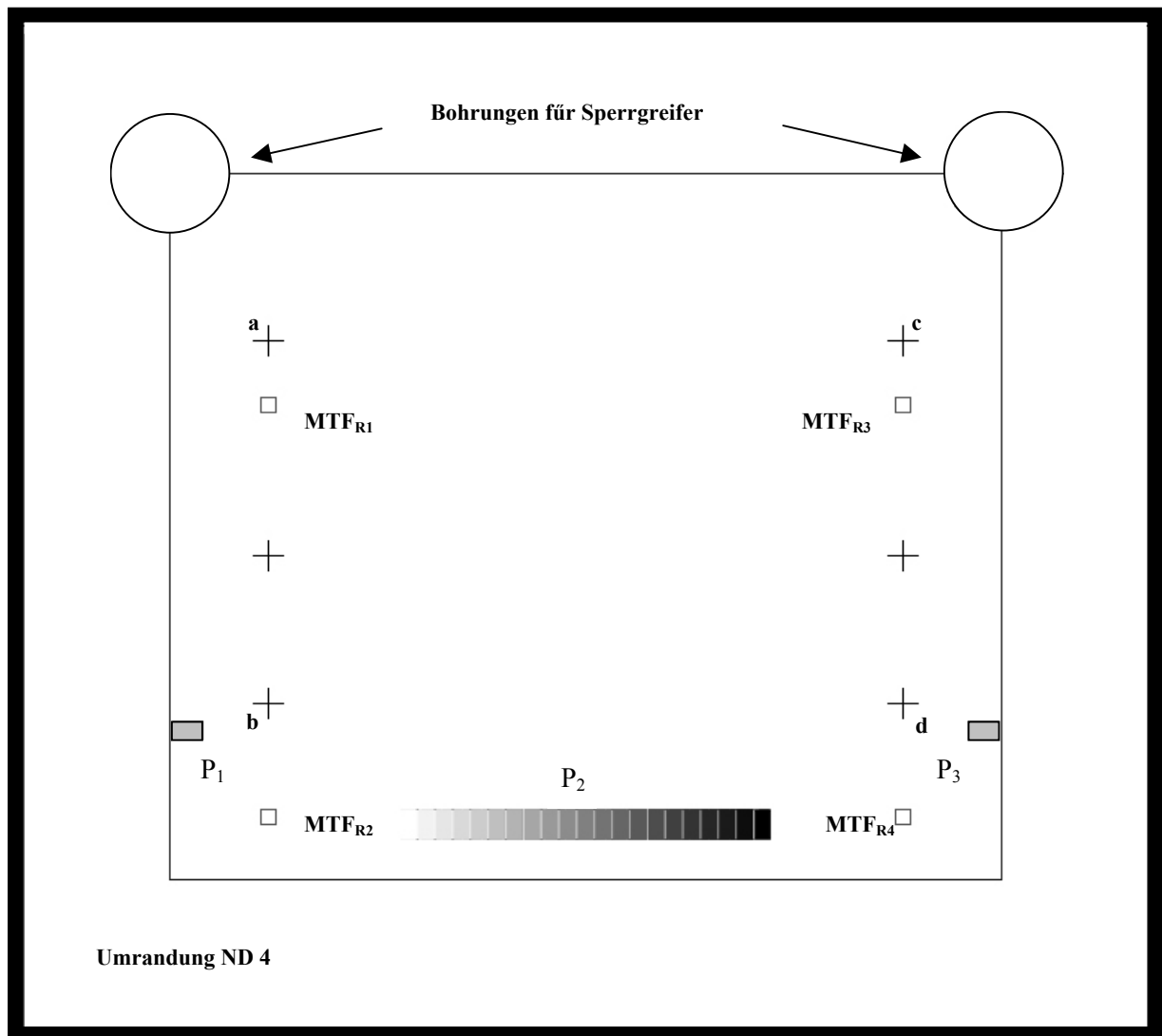


Abb.3.10.: Skizze der Glasplatte mit Referenzmuster (CAD-Zeichnung im Anhang)

a, b, c, d	geometrische Referenzmarken Strichstärke $0,01\text{ mm}$ Toleranz der absoluten Position $< 0,001\text{ mm}$
$MTF_{R1}-MTF_{R4}$	Referenzkanten zur Bestimmung der Scanner-MTF
P_1	Rastergraukeil zur Linearitätsüberprüfung
$P_{2,3}$	50% Grau zur Bestimmung der Scanner Ausleuchtungshomogenität



Abb. 3.11.: Glasplatte mit Referenzmuster, eingebaut in der Halterung

Um die Lage des Bildes zu beschreiben, wird die Abweichung von vier Filmbildpunkten zu den jeweiligen Referenzpunkten berechnet. Schwankungen des Scanners gehen in die Messung nicht mehr mit ein, da sich die in ihrer Lage bekannten Referenzkreuze in unmittelbarer Nähe des zu erwartenden Bildpunktes befinden. Untersuchungen ergaben einen maximalen Abstand der Belichtungspunkte von *30 Pixeln (0,18 mm)* von der Referenz. Bei 1,5 % maximaler Scannerschwankung liegt die zu erwartende Genauigkeit also bei *< 0,5 Pixel*.

Für das nun folgende Scannen wird die mitgelieferte Software des Herstellers verwendet; zur Aufnahme der Halterung kommt der Diaeinschub zum Einsatz.



Abb.3.13.: Halterung im Diaeinschub des Scanners

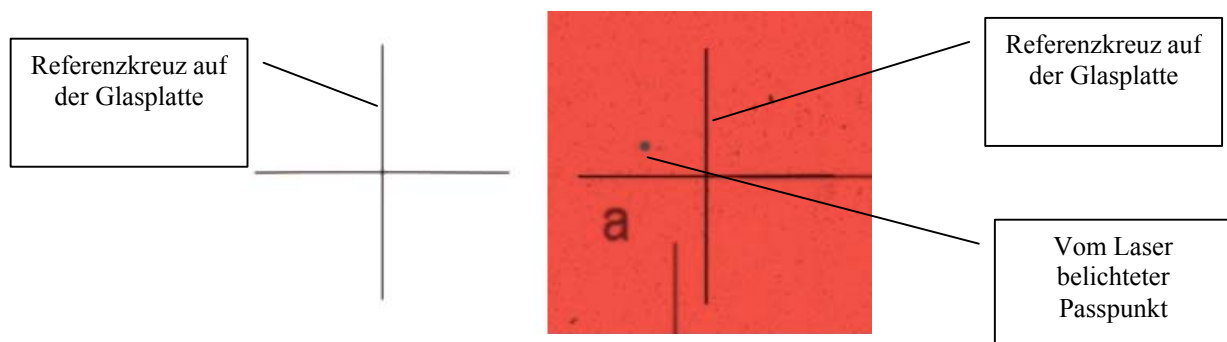


Abb.3.14.: Ausschnitt eines Analysescans links ohne, rechts mit Filmprobe

4 Referenzierung und Kalibrierung des Systems

Bevor die digitalisierten Bilddaten für eine Qualitätsbewertung verwendet werden können, muss sowohl die mechanische, wie auch die optische Genauigkeit des Systems überprüft und auf Basiseinheiten referenziert werden. Die hier ermittelten Korrektur- und Umrechnungsgrößen werden als Parameterset individuell für jedes Messsystem bestimmt und in der Software gespeichert.

4.1 Geometrische Referenzierung

Die Präzision der geometrischen Messung hängt im Wesentlichen von der Montagegenauigkeit der Glasplatte zu den Sperrgreiferstiften ab. Um das Einkleben der Glasplatte in die Halterung so reproduzierbar und genau wie möglich zu gestalten, wurde eine Justiervorrichtung entwickelt.



Abb.4.1.: Justiervorrichtung

Die in die Halterung eingeklebte Glasplatte wird nun einmal an einem Messmikroskop (Abb. 4.1. rechts) vermessen und die Abweichung zur Sollposition als Korrekturparameter $K_i(x_{a,c_{montage}}/y_{a,c_{montage}})$ für jede Seriennummer i in der Messsoftware gespeichert.

4.2 Photometrische Referenzierung



Abb.4.2.: Trilinearer CCD

Die Erfassung photometrischer Größen wird durch Streulichteinflüsse beeinflusst, die vom CCD/ Beleuchtungssystem des Analysescanners stammen. Dieser Einfluss kann dadurch deutlich minimiert werden, dass eine Messung entlang der Bildbreite durch Drehung der Filmprobe (in Richtung der belichteten Zeile) immer mit den gleichen Sensorelementen und dem gleichen Ausleuchtungsbereich geschieht. Der verbleibende Fehler wird durch Scannen eines Kalibrier-Negatives ermittelt, welches dort unbelichtete Stellen aufweist, wo später photometrische Größen ermittelt werden. Einer möglichen Differenz zur Schleierdichte der aktuell zu vermessenden Filmprobe wird dadurch Rechnung getragen, dass man die Korrekturvektoren auf ihren Mittelwert normiert und mit der aktuellen Schleierdichte multipliziert.

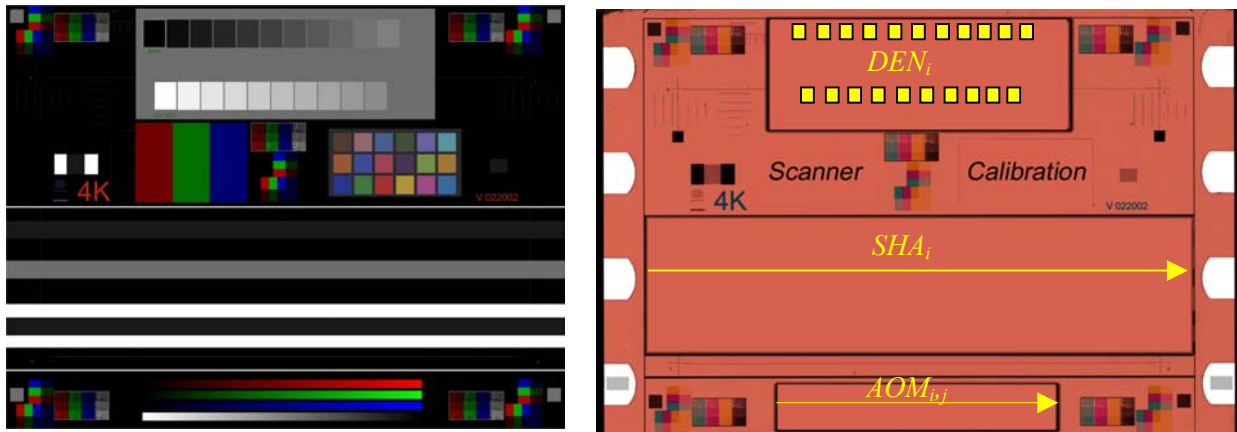


Abb.4.3.: Kalibriernegativ

Es ergeben sich die Korrekturvektoren $0 < y_k < 1$ für den Bereich der Kennlinienmessung:

$$DEN_i(y_k) \text{ mit } k = 1..21 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.1)$$

der Belichtungshomogenität,

$$SHA_i(y_k) \text{ mit } k = 1..255 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.2)$$

und für die Überprüfung der Akusto-Optischen Modulatoren

$$AOM_{i,j}(y_k) \text{ mit } k = 1..1023 \text{ und } i = R, G, B \text{ sowie } j = R, G, B \quad (4.3)$$

Ursprünglich war vorgesehen, den Kalibriervorgang als festen Schritt vor jeder Messung einzubauen. Mehrfachmessungen mit dem verwendeten Sprintscan 4000 ergaben jedoch eine gute zeitliche Stabilität der einmal ermittelten Korrekturwerte. Es genügt, das Kalibriernegativ einmal wöchentlich zu verwenden.

Zunächst soll die photometrische Linearität des Scanners bewiesen werden. Dieser Schritt ist grundsätzlich einmal für jedes Scannermodell notwendig, kann aber dann als Konstante betrachtet werden. Die verwendete Prozedur eignet sich gleichzeitig zur Überprüfung der zeitlichen Stabilität des Systems „CCD/Beleuchtung“ und der automatischen Kalibrierfunktion.

Beweis der Linearität des Scanners bis zur notwendigen Maximaldichte

Durchgeführt wird der Linearitäts-Nachweis durch die Abtastung eines Graukeils, der auf die Glasplatte aufgedampft ist (Abb. 3.10.). Bei dieser Art der Herstellungstechnik werden Graustufen nicht wie in der Photographie durch Halbtöne erzeugt, sondern durch Rasterung. Die Abstufung des Graukeils soll in Dichten äquidistant und linear verlaufen. Für die Bedampfung sind jedoch die Rastertonwerte ausschlaggebend, diese müssen berechnet werden.

Tonwertberechnung zur Erstellung eines Graukeils mit linearem Rasterdichteanstieg

Für die Berechnung der Rastertonwerte gilt:

$$p = \frac{(1 - 10^{-D_R})}{(1 - 10^{-D_V})} * 100\% \quad \text{mit} \quad (4.4)$$

p : Tonwert für die Rasterung

D_R : Rasterdichte

D_V : Maximal Dichte

Für einen Graukeil mit 18 Stufen und einer maximal erzeugbaren Rasterdichte von $D_V \approx 3$ folgt

$$\Delta D_R = \frac{D_V}{18} = 0,176 ; \quad (4.5)$$

entsprechend berechnen sich die Rastertonlichten.

Stufe	Rasterdichte D_R	Tonwert [%]	Stufe	Rasterdichte D_R	Tonwert [%]
1	0,000	0,00	10	1,584	97,49
2	0,176	33,35	11	1,760	98,36
3	0,352	55,59	12	1,936	98,94
4	0,528	70,42	13	2,112	99,33
5	0,704	80,31	14	2,288	99,58
6	0,880	86,90	15	2,464	99,76
7	1,056	91,30	16	2,640	99,87
8	1,232	94,23	17	2,816	99,95
9	1,408	96,19	18	2,992	100,00

Tab. 4.4.: Rastertonwerte und Zieldichten

Die Anforderung an ein Kalibriernormal bezüglich mechanischer und zeitlicher Stabilität sowie die absolute Genauigkeit (Linearität und Äquidistanz) werden durch diesen aufgedampften Keil wesentlich besser erfüllt als durch ein Stück Film.



Abb.4.5.: Rastergraukeil mit darüber gelegtem Negativ im Scan

$$RGK_i(y_k) \text{ mit } k = 1..18 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.6)$$

Der Graukeil wird zusammen mit dem Kalibrier negativ gescannt. Die minimale Dichte der Filmprobe, der Schleier, addiert sich als Sockel zu den Rasterdichten. Die Luminanzwerte $RGK_i(y_k)$ für R, G, B werden integrierend für jedes Feld ermittelt und gegenüber der Dichte aufgetragen. Wie in Abb. 4.6. zu erkennen ist, erfüllt der Scanner die geforderter lineare Interpretation von Helligkeiten bis Dichte 3.

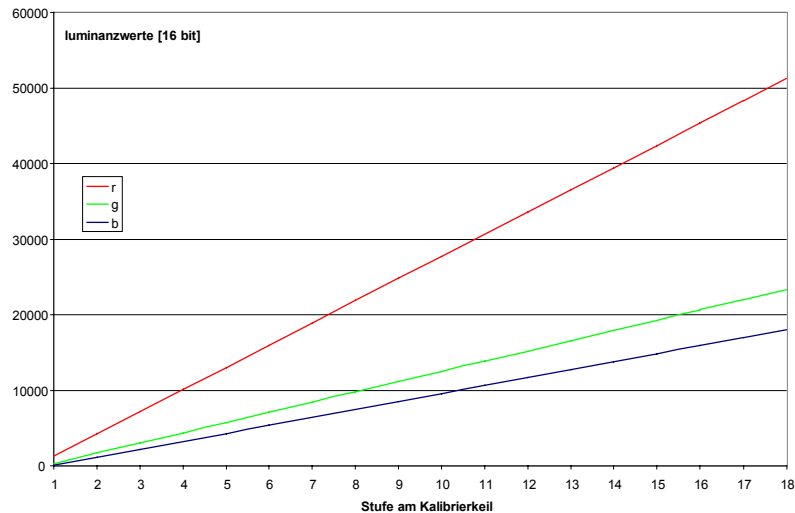


Abb.4.6.: Dichtewerte der 18 Rasterkeilstufen

Die Vektoren $RGK_i(y_k)$ werden dem Parameterset zur Überprüfung der zeitlichen Stabilität hinzugefügt.

4.3 Bestimmung des Scanner-Farbraumes

Die standardisierte, densitometrische Beschreibung von Negativfilm erfolgt über eine spektrale Bewertungskurve, der Status M Charakteristik (Abb. 1.1.). In Densitometern wird diese Bewertungskurve durch den Einsatz schmalbandiger Filter vor dem Empfänger erreicht. Der zur Analyse eingesetzte Filmscanner besitzt zwar auch Filter, die direkt über den CCD Elementen aufgedampft werden, der Farbraum der durch die spektralen Eigenschaft dieser Filter beschrieben wird, ist jedoch unbekannt, und unterscheidet sich von Status M. Das bedeutet, für eine Berechnung der Filmdichte mit Status M muss die spektrale Charakteristik bzw. der dadurch vorgegebene Farbraum des Scanners ermittelt und auf Status M umgerechnet werden.

Farbraumkonvertierung

Für eine Farbraumkonvertierung gibt es prinzipiell zwei mögliche Vorgehensweisen, entweder die spektralen Eigenschaften des Empfängers sind bekannt, dann wird eine „Übersetzungs-Filterkurve“ durch Multiplikation der gewünschten Filterkurve mit der tatsächlichen erreicht, oder wie hier der Fall, die spektrale Charakteristik des Empfängers ist unbekannt und muss empirisch ermittelt und dann auf die Zielkurve umgerechnet werden. Der vollständige Versuch würde verlangen, dass jede mögliche Farbe des belichteten Negativs ($1023 \text{ für rot} * 1023 \text{ für grün} * 1023 \text{ für blau}$) durch einen digitalen Scanner RGB-Wert interpretiert, in Dichte umgerechnet und mit der, von einem Status M Densitometer gemessenen, Dichte verglichen wird.

Es ist nun leicht einzusehen, dass ein solcher Versuch nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist, daher wählt man aus dem Farbraum eine begrenzte Anzahl von Farben aus, die bei der subjektiven Bewertung eine besondere Rolle spielen, den sogenannten „Schlüssel-farben“ oder Keycolors. Diese setzen sich z.B. aus Hauttönen und besonders gesättigten Farben, wie Himmelblau und Grasgrün zusammen. Es gehören jedoch nicht nur in der Natur vorkommende Farben zu den Keycolors, sondern

auch künstlich geschaffene, das Rot einer Cola Dose z.B.. Farben, die auch von einem „ungeübten“ Betrachter sehr leicht auf ihre Autenzität in der bildlichen Darstellung beurteilt werden können.

Ein oft verwendetes Testbild, das auch als digitales Pendant vorliegt und einige dieser Keycolors enthält, ist der Macbeth Colorchecker (Abb. 4.7.).



Abb.4.7.: Original Macbeth Colorchecker

Da die Dynamik des Standardtestbildes (Abb. 4.7.) unter der technisch vom Laserrecorder verwendeten liegt, wurde zusätzlich eine zweite Vorlage mit voller Dynamik erzeugt (Abb. 4.8.).

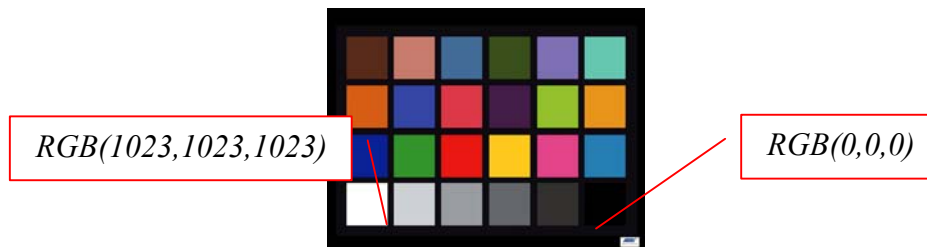


Abb.4.8.: Macbeth Colorchecker mit erhöhter Dynamik

Die $2 * 24$ Farbflächen beider Testbilder wurden, um die Vermessung zu erleichtern, als Vollbild ausbeleuchtet und mit einem Status M Densitometer vermessen. Die Belichtung enthielt ebenso beide Bilder in der dargestellten Weise, um sie mit dem Analysescanner zu digitalisieren und für jede Farbfläche die vom Scanner interpretierte Dichte zu berechnen.

Die Scannerdichten $DS_{R,G,B}$ ergeben sich zu:

$$DS_{R,G,B} = \log_{10} \left(\frac{CV_{R,G,B}}{CV_{MAX,RGB}} \right) \quad (4.7)$$

mit $CV_{R,G,B}$ als vom Scanner erzeugter 16 bit Wert und $CV_{MAX,RGB}$ als Maximalwert; dieser wird vom Scanner automatisch auf die Stelle mit der geringsten Transparenz im Bild eingestellt. Dadurch, dass der Weiß- und Schwarzpunkt jeweils durch das mitgescannte Perforationsloch und die aufgedampfte Schicht gegeben ist, verwendet die automatische Kalibrierung immer die volle 12 bit Dynamik. Der Maximalwert im Scan $CV_{MAX,RGB}$ kann also zu $2^{16} = 65536$ (Wandlung von 12 bit nach 16 bit für das Tiff Datenformat!) angenommen werden.

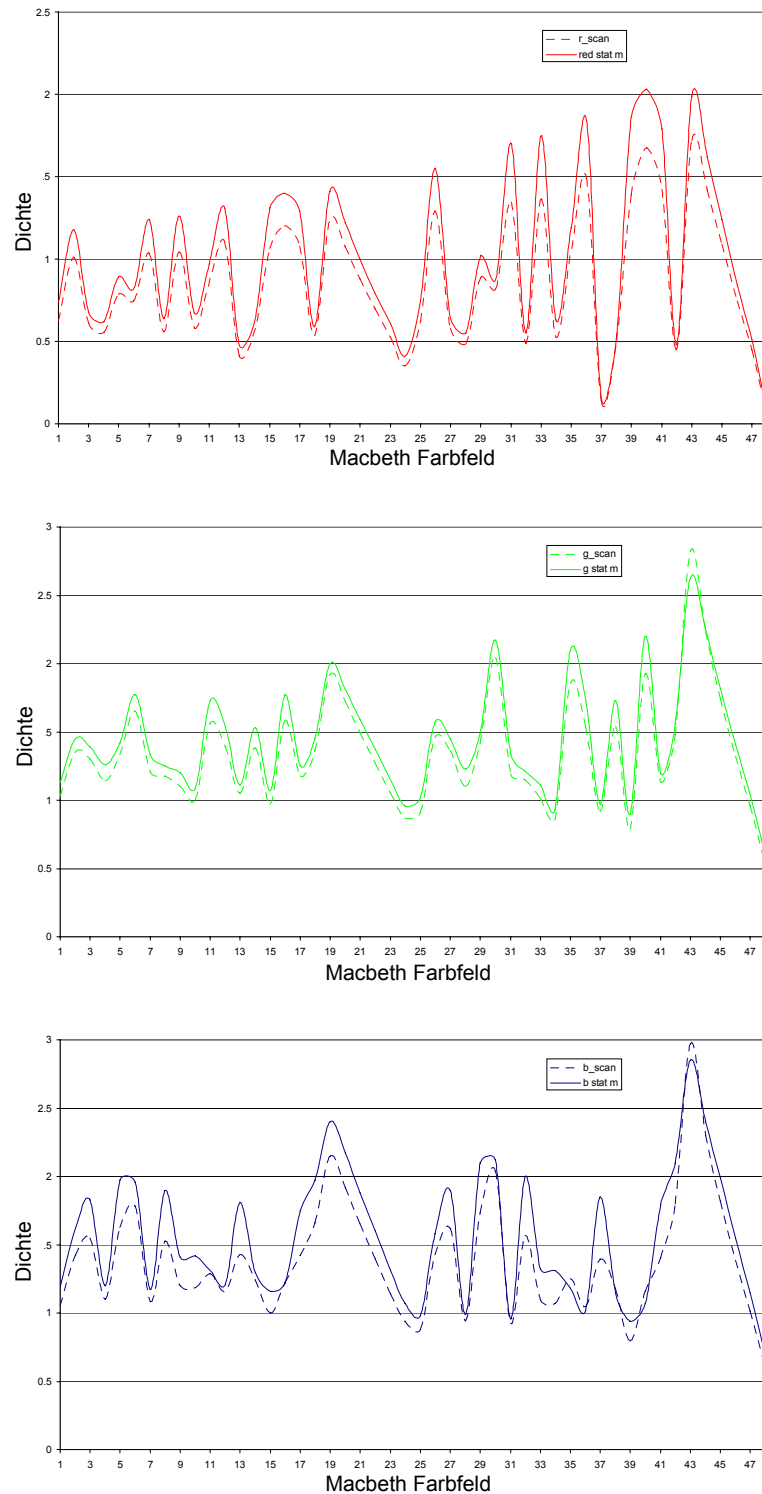


Abb.4.8.: „Rohe“ Scannerdichten im Vergleich zur Status-M-Dichte der 48 Macbeth Felder

Vergleicht man die gewonnenen Scannerdichten mit den Densitometerdichten, so ist deutlich zu erkennen, dass der Scanner zwar eine grundsätzlich ähnliche Dichtefunktion erzeugt, für eine absolute Angabe von Status M Dichten aber so nicht verwendet werden kann.

4.3.1 Zusammenhang zwischen Scannerdichten und Densitometerdichten

Um die Abhängigkeit der Scannerdichten von den Densitometerdichten zu untersuchen, wurden je ein Rot-, Grün- und Blaukeil ausbelichtet vermessen und die Scannerdichten über den Densitometerdichten aufgetragen.

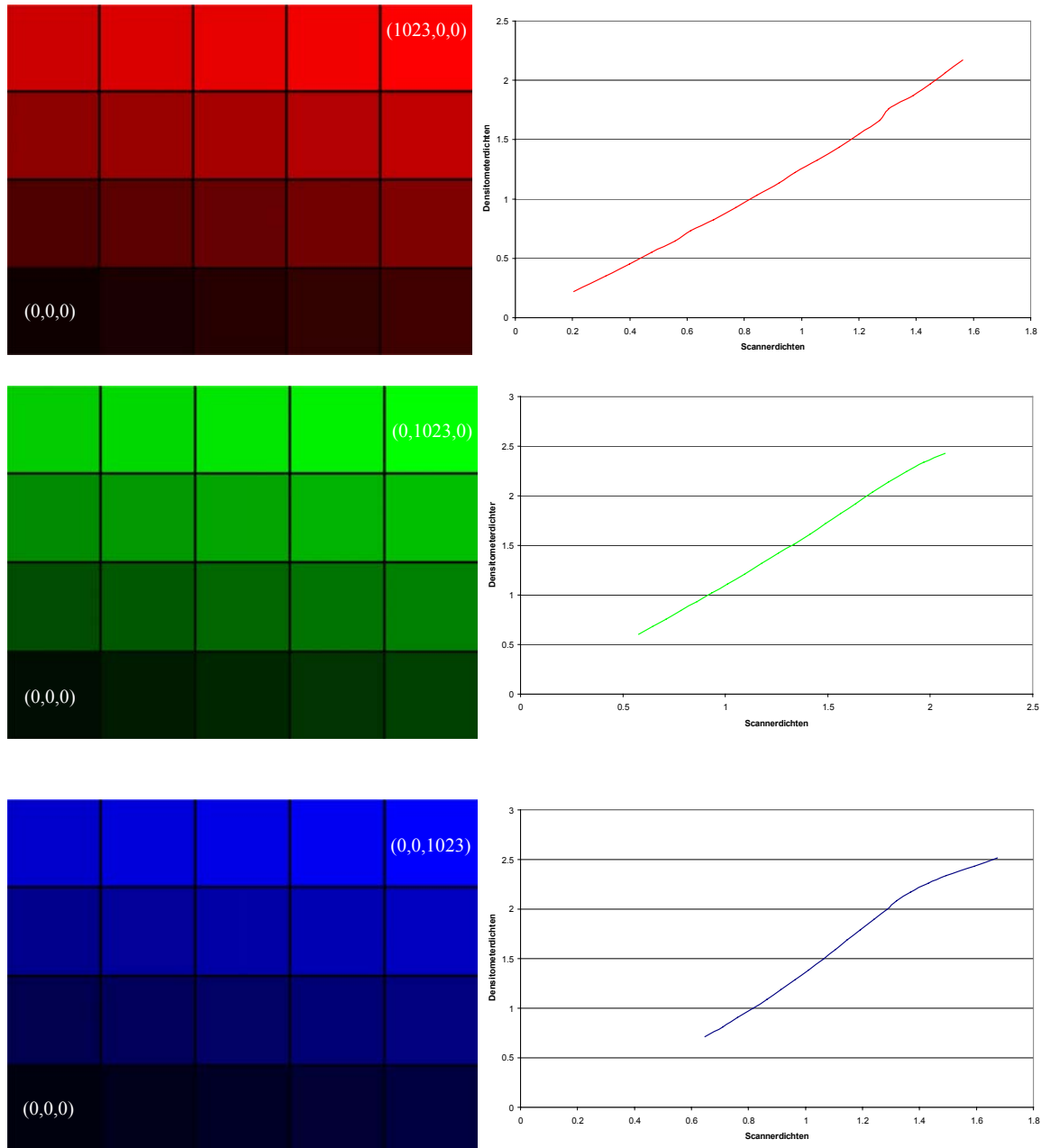


Abb.4.9.: Zusammenhang zwischen Scannerdichten und Status-M-Dichten in den Grundfarbkeilen

Wie in Abb.4.9. zu erkennen, scheint in guter Näherung ein linearer Zusammenhang in den einzelnen Farben zwischen der logarithmischen Helligkeitsinterpretation des Scanners und der des Densitometers zu bestehen. Dieser Zusammenhang kann für alle drei Farben durch je ein lineares Gleichungssystem beschrieben werden. Berücksichtigt werden muss jedoch das Farbnebensprechen, ein Effekt der beim Farbnegativ auftritt und dazu führt, dass die Belichtung einer Schicht zu Nebendichten in den jeweils benachbarten Schichten führt (Kapitel 1.3).

4.3.2 Umrechnung der Scannerdichten in Status-M-Dichten

Es ergibt sich also je eine R , G , B Abhängigkeit für rote Status-M, grüne Status-M und blaue Status-M-Dichten. Definiert man nun die Scannerdichten der 48 Macbeth Farbfelder zu $R_{s1}G_{s1}B_{s1} \dots R_{s48}G_{s48}B_{s48}$ und die Densitometerdichten zu $R_{d1}G_{d1}B_{d1} \dots R_{d48}G_{d48}B_{d48}$,

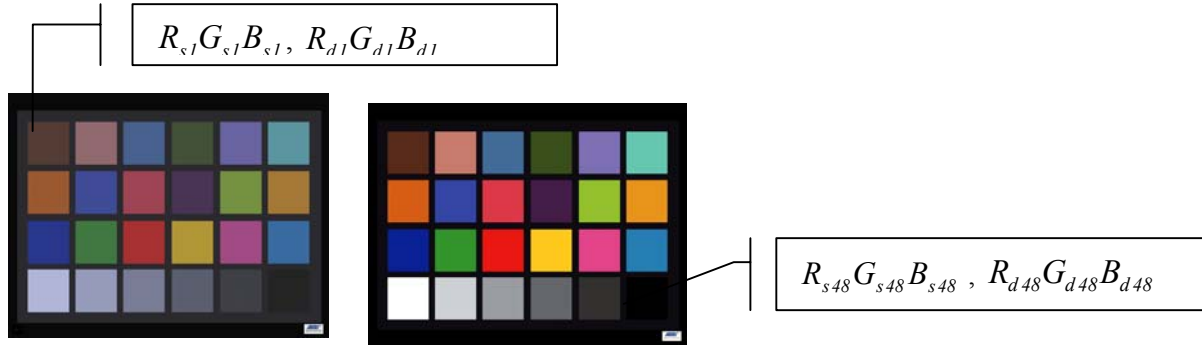


Abb.4.10.: Matrixaufbau

so gelten folgende lineare Gleichungssysteme:

Status M Rot (4.8)

$$R_{s1}x_{r1} + G_{s1}x_{r2} + B_{s1}x_{r3} + x_{r4} = R_{d1}$$

$$R_{s2}x_{r1} + G_{s2}x_{r2} + B_{s2}x_{r3} + x_{r4} = R_{d2}$$

.....

.....

$$R_{s48}x_{r1} + G_{s48}x_{r2} + B_{s48}x_{r3} + x_{r4} = R_{d48}$$

Status M Grün (4.9)

$$R_{s1}x_{g1} + G_{s1}x_{g2} + B_{s1}x_{g3} + x_{g4} = G_{d1}$$

$$R_{s2}x_{g1} + G_{s2}x_{g2} + B_{s2}x_{g3} + x_{g4} = G_{d2}$$

.....

.....

$$R_{s48}x_{g1} + G_{s48}x_{g2} + B_{s48}x_{g3} + x_{g4} = G_{d48}$$

Status M Blau (4.10)

$$R_{s1}x_{b1} + G_{s1}x_{b2} + B_{s1}x_{b3} + x_{b4} = B_{d1}$$

$$R_{s2}x_{b1} + G_{s2}x_{b2} + B_{s2}x_{b3} + x_{b4} = B_{d2}$$

.....

.....

$$R_{s48}x_{b1} + G_{s48}x_{b2} + B_{s48}x_{b3} + x_{b4} = B_{d48}$$

Aus den Gleichungen (4.8 bis 4.10) ergibt sich ein inhomogenes Gleichungssystem, das sich in Matrizenform darstellen lässt:

$$\begin{pmatrix} R_{s1} & G_{s1} & B_{s1} & 1 & R_{d1} \\ R_{s2} & G_{s2} & B_{s2} & 1 & R_{d2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s48} & G_{s48} & B_{s48} & 1 & R_{d48} \end{pmatrix} \text{ mit dem Lösungsvektor } x_{R1}, x_{R2}, x_{R3} \text{ und der Konstanten } x_{R4}$$

$$\begin{pmatrix} R_{s1} & G_{s1} & B_{s1} & 1 & G_{d1} \\ R_{s2} & G_{s2} & B_{s2} & 1 & G_{d2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s48} & G_{s48} & B_{s48} & 1 & G_{d48} \end{pmatrix} \text{ mit dem Lösungsvektor } x_{G1}, x_{G2}, x_{G3} \text{ und der Konstanten } x_{G4} \quad (4.11)$$

$$\begin{pmatrix} R_{s1} & G_{s1} & B_{s1} & 1 & B_{d1} \\ R_{s2} & G_{s2} & B_{s2} & 1 & B_{d2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s48} & G_{s48} & B_{s48} & 1 & B_{d48} \end{pmatrix} \text{ mit dem Lösungsvektor } x_{B1}, x_{B2}, x_{B3} \text{ und der Konstanten } x_{B4}$$

Zur praktischen Auflösung des Systems kann das Gauss'sche Eliminationsverfahren verwendet werden. Ein Status M Dichtewert einer beliebigen Scannerdichte berechnet sich nun zu:

$$R_{STATm} = R_s x_{R1} + G_s x_{R2} + B_s x_{R3} + x_{R4} \quad , \quad (4.12)$$

$$G_{STATm} = R_s x_{G1} + G_s x_{G2} + B_s x_{G3} + x_{G4} \quad , \quad (4.13)$$

$$B_{STATm} = R_s x_{B1} + G_s x_{B2} + B_s x_{B3} + x_{B4} \quad . \quad (4.14)$$

Für die Multiplikation der Matrix B mit einem beliebigen Scannerdichtevektoren wird die inverse Matrix L mit den Offsetwerten gebildet:

$$B = \begin{bmatrix} x_{R1} & x_{R2} & x_{R3} & \vdots & x_{R4} \\ x_{G1} & x_{G2} & x_{G3} & \vdots & x_{G4} \\ x_{B1} & x_{B2} & x_{B3} & \vdots & x_{B4} \end{bmatrix} \quad L = B^T = \begin{bmatrix} x_{R1} & x_{G1} & x_{B1} \\ x_{R2} & x_{G2} & x_{B2} \\ x_{R3} & x_{G3} & x_{B3} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{R4} & x_{G4} & x_{B4} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

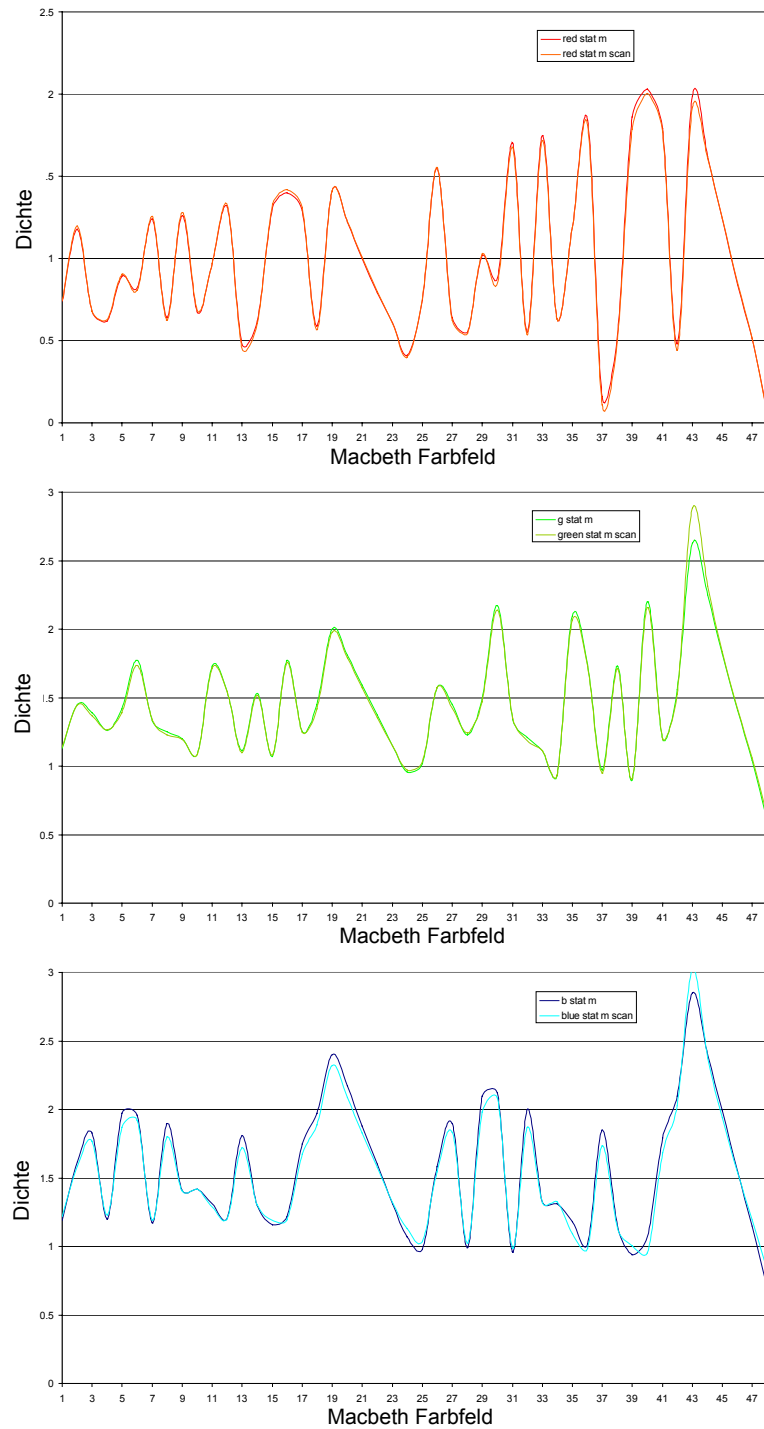


Abb.4.11.: Scannerdichten nach der Umrechnung im Vergleich zur Status M Dichte

Wie Abb.4.11. zeigt, entsprechen die Scannerdichten nach der Umrechnung einer brauchbaren Übereinstimmung mit den Status-M-Densitometerdichten. Die Berechnung der aus den Linearfaktoren bestehenden Lösungsmatrix B wird einmal für jeden Scanner durchgeführt, invertiert und im Parametersatz gespeichert.

Einschränkung der Gültigkeit

Die Gültigkeit dieses Ansatzes wurde nur für das Negativmaterial 5242 bewiesen. Die Genauigkeit der Umrechnung von Scanner in Status M Dichten ist umso besser gewährleistet, als der Farbtort der zu vermessenden Probe in der Nähe der 48 Farbfelder (*Abb. 4.10. und 4.11.*) liegt. Aus diesem Grund wird jede densitometrische Messung daraufhin überprüft und bei zu großen Abweichungen von den Referenzfarbtorten abgebrochen.

4.4 MTF des Scanners

Die Messung der optischen Übertragungsfunktion MTF am Film sollte idealerweise ein Kriterium sein, das ausschließlich die Qualität des Laser-Belichters beschreibt. Das gescannte Bild an dem die Bewertung durchgeführt wird, ist jedoch ein Resultat der Kaskadierung aus den Übertragungsfunktionen :

$$MTF_{scan} = MTF_{Laser} * MTF_{Film5242} * MTF_{Scanner} \quad (4.16)$$

Weil nun stets das gleiche Filmmaterial für die Belichtung verwendet wird, ist es zulässig, die $MTF_{Film5242}$ als Konstante mit dem Wert 1 zu betrachten. Das (örtliche) Übertragungsverhalten einer spezifischen Emulsion wird durch seine chemischen Bestandteile bestimmt, die sich nicht verändert. [L4.1]

Die gesuchte MTF_{Laser} errechnet sich im gescannten Bild also zu:

$$MTF_{Laser} = \frac{MTF_{scan}}{MTF_{Scanner}} \quad (4.17)$$

Die Messung der Scanner MTF erfolgt über ein Verfahren, bei dem die Fouriertransformation des Linienbildes einer Kante bestimmt wird. Das mathematische Modell wird in Kapitel 5.8 ausführlich beschrieben. Das links abgebildete Quadrat ist Bestandteil der Referenzplatte und stellt eine „ideale“ Kante (ca. 10-fache örtliche Auflösung gegenüber der Filmbelichtung, Kapitel 1.5) in horizontaler und vertikaler Richtung dar.

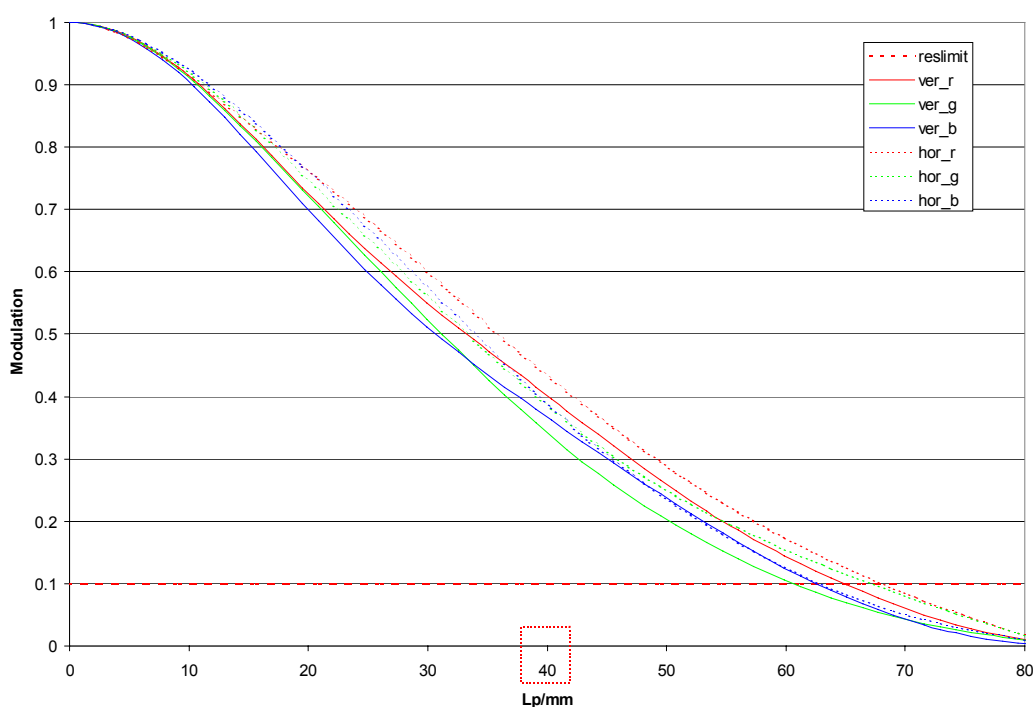
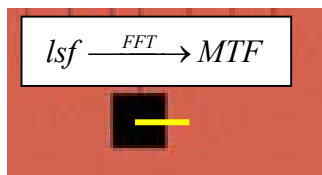


Abb.4.12.: MTF des Analysescanners gemessen an der aufgedampften Referenzkante

Das Ergebnis der Messung liefert einen Vektor mit den MTF Werten für 0-64 Lp/mm:

$$MTF_i(y_k) \text{ mit } k = 1..64 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.18)$$

4.5 Zusammenfassende Auflistung der Kompensationsvektoren:

Geometrischer Montage Offset der Referenzkreuze:

$$K_i(x_{a,c_{montage}}/y_{a,c_{montage}}) \quad (4.19)$$

Photometrische Kompensation von Scannerstreulicht und Homogenitätsschwankungen:

$$\text{Dichte (Pos.4)} \quad DEN_i(y_k) \text{ mit } k = 1..21 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.20)$$

$$\text{Homogenität (Pos. 9)} \quad SHA_i(y_k) \text{ mit } k = 1..255 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.21)$$

$$\text{AOM (Pos. 12)} \quad AOM_{i,j}(y_k) \text{ mit } k = 1..1023 \text{ und } i = R, G, B \text{ sowie } j = R, G, B \quad (4.22)$$

Linearität und Autokalibration:

$$RGK_i(y_k) \text{ mit } k = 1..18 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.23)$$

Invertierte Matrix mit den Linearfaktoren und Konstanten zur „Farbraumkonvertierung“ nach Status M:

$$L = \begin{bmatrix} x_{R1} & x_{G1} & x_{B1} \\ x_{R2} & x_{G2} & x_{B2} \\ x_{R3} & x_{G3} & x_{B3} \\ x_{R4} & x_{G4} & x_{B4} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Vektor mit den Scanner MTF Werten

$$MTF_{i_Scanner}(y_k) \text{ mit } k = 1..64 \text{ und } i = R, G, B \quad (4.25)$$

Alle in Kapitel 4 ermittelten Kompensationsgrößen dienen dazu, den Einfluss des Messsystems auf das Ergebnis zu eliminieren, bzw. eine Umrechnung in Standardeinheiten zu ermöglichen.

5 Messprozeduren

Nachdem die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Messwerkzeuges geklärt ist, sollen im nachfolgenden Kapitel die mathematischen Grundlagen für die Berechnung der Bildqualitäts-Parameter besprochen werden. Nachstehende Betrachtungen beziehen sich auf das, vom Analysescanner gemeinsam mit der Referenz digitalisierte, Bild. Die Berechnung der geometrischen Daten schließt die Generierung der Steuerparameter des Laserbelichters mit ein. Alle Messwerte berücksichtigen die in Kapitel 4 behandelten Korrekturen und Umrechnungsparameter.

5.1 Bestimmung der Lageparameter und Berechnung der Kompensationsgrößen

Wie in Kapitel 3 erwähnt, definiert sich die Lage des Bildes relativ zur Mitte des Referenzperfoloches. Es ergibt sich also ein Koordinatensystem mit der dargestellten Orientierung.



Abb.5.1.: Position der Testmuster zur Geometriebestimmung

Die Messung der Bildgeometrie erfolgt an zwei Stellen im Bild.

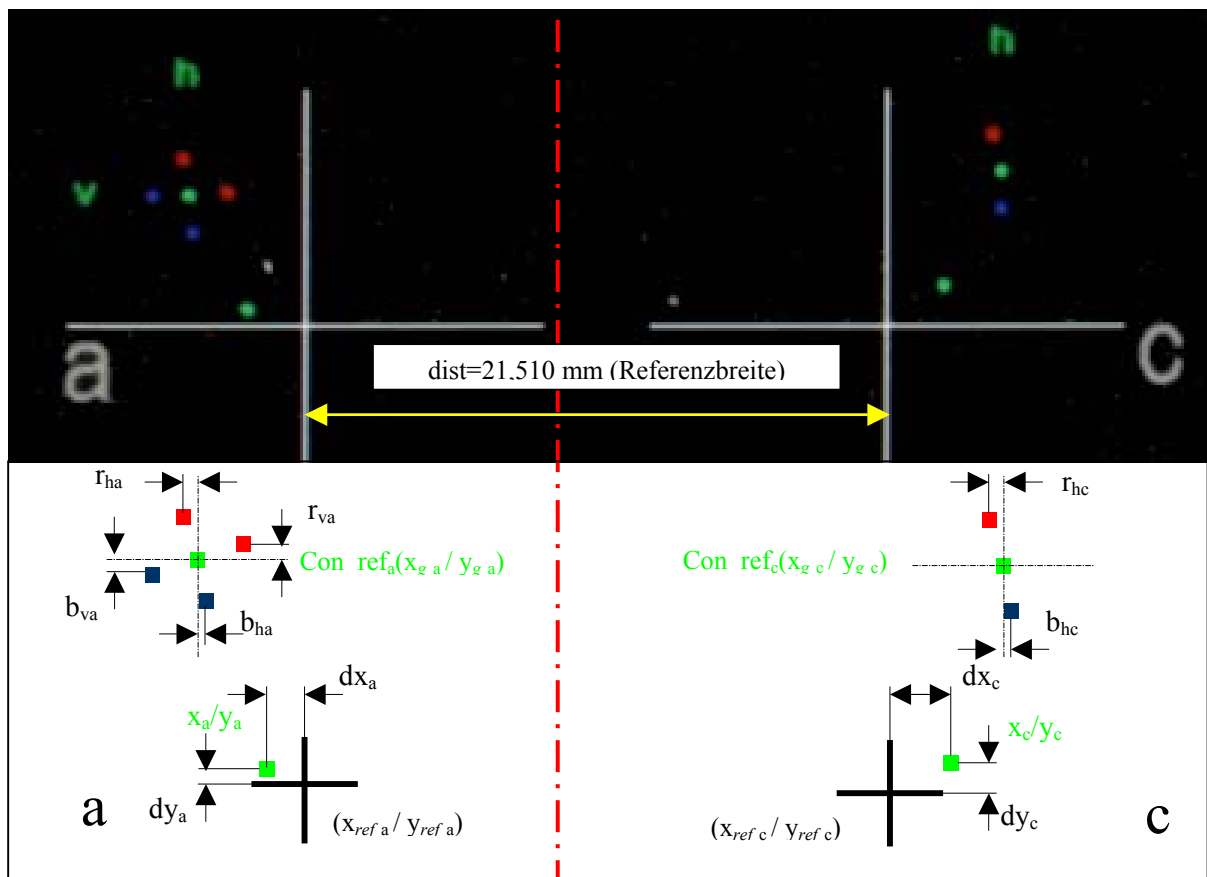


Abb.5.2.: Obere Bildhälfte: Ausschnitte a, c im Scan, darunter die Systematik der Bezeichnung.

Zuerst wird die Lage des grünen Bildes beschrieben.

Die grünen Passpunkte bei a und c werden mit einem Offset $x_{oa,c}, y_{oa,c}$ von $20\text{ Pixeln } (0,12\text{ mm})$ in x und y relativ zu x_{ref} bzw. y_{ref} versehen, um das Verdecken des Passpunktes durch das Referenzkreuz im Falle einer idealen Belichtung zu verhindern.

$$x_{oa} = -0,12\text{mm}$$

$$y_{oa} = -0,12\text{mm}$$

$$x_{oc} = +0,12\text{mm}$$

$$y_{oc} = -0,12\text{mm}$$

Die Abstände $d_{a,c}$ ergeben sich unter Berücksichtigung der Montagetoleranz ($x_{a,c,montage}, y_{a,c,montage}$) und des Offsets $x_{oa,c}, y_{oa,c}$.

$$dx_a = x_a + x_{oa} + x_{a,montage} - x_{ref_a} \quad (5.1)$$

$$dy_a = y_a + y_{oa} + y_{a,montage} - y_{ref_a} \quad (5.2)$$

bzw. für die rechte Bildseite:

$$dx_c = x_c + x_{oc} + x_{c,montage} - x_{ref_c} \quad (5.3)$$

$$dy_c = y_c + y_{oc} + y_{c,montage} - y_{ref_c} \quad (5.4)$$

$$\text{Die Abweichung von der idealen Bildbreite entspricht } \Delta width = dx_c - dx_a \quad (5.5)$$

Die Beschreibung dispersiver Abbildungsfehler (Konvergenz) wird ebenfalls bei Pos_a und Pos_c vorgenommen; bestimmt wird die relative x und y Abweichung zu Grün ($x_{Ga,c} / y_{G,a,c}$).

Konvergenz rot/blau horizontal :

$$R_{ha} = x_{Rha} - x_{ga} \text{ und } B_{ha} = x_{Bha} - x_{Ga} \quad (5.6)$$

$$R_{hc} = x_{Rhc} - x_{gc} \text{ und } B_{hc} = x_{Bhc} - x_{Gc} \quad (5.7)$$

Weil die Qualität der vertikalen Überdeckung rein durch die optische Strahljustage des Punktbildes für R, G, B bestimmt wird, genügt es, die y Konvergenz am Bildanfang bei Pos_a zu messen.

$$R_{va} = y_{Rha} - y_{Ga} \text{ und } R_{Ba} = y_{Bha} - y_{Ga} \quad (5.8)$$

Berechnung der Recorder Steuerparameter

Zur detaillierten Beschreibung der Steuerparameter sei auf 1.6.2 verwiesen.

- Verzögerung „Delay“: $d_{R,G,B} [\mu m]$ („verschiebt“ das rote, grüne, blaue Bild in x)

$$d_{R_new} = d_{R_old} + d_{xa} + R_{ha} \quad (5.9)$$

$$d_{G_new} = d_{G_old} + d_{xa} \quad (5.10)$$

$$d_{B_new} = d_{B_old} + d_{xa} + B_{ha} \quad (5.11)$$

- Verzögerung „Sliding Carriage“: $s_{RGB} [\mu m]$ („verschiebt“ das gesamte Bild in y)

$$s_{new} = s_{old} - d_{ya} \quad (5.12)$$

- Spreizung „F-Theta“: $F\Theta_{R,G,B}$ („spreizt“ das rote, grüne, blaue Bild in x)

$$F\Theta_{R_new} = F\Theta_{R_old} \left(1,0 - \frac{R_{hc} - R_{ha} + \Delta width}{dist} \right) \quad (5.13)$$

$$F\Theta_{G_new} = F\Theta_{G_old} \left(1,0 - \frac{\Delta width}{dist} \right) \quad (5.14)$$

$$F\Theta_{B_new} = F\Theta_{B_old} \left(1,0 - \frac{B_{hc} - B_{ha} + \Delta width}{dist} \right) \quad (5.15)$$

5.2 Automatisches Finden der Referenz- und Passpunkte

Das Auffinden der Passpunkte soll automatisch geschehen, dazu wird eine in der Bildverarbeitung sehr häufig angewandte Operation benutzt, die *Grauwert-Morphologie* [L5.1].

Das Wort „Morphologie“ beschreibt gewöhnlicherweise einen Teil der Biologie, der sich mit der Form und der Struktur von Tieren und Pflanzen beschäftigt. Man benutzt dasselbe Wort hier im Zusammenhang mit der „mathematischen Morphologie“, die ein Werkzeug zur Extraktion von Bildkomponenten darstellt. Diese Bildkomponenten eignen sich zur Bildrepräsentation und zur Beschreibung von Formen wie z.B. Kanten, Skeletonen und der konvexen Hülle. Hier kommt die Morphologie bzw. das morphologische Ausdünnen zur automatischen Auffindung der Referenzmuster und der Passpunkte zum Einsatz.

Das Ausdünnen wird in der Bildverarbeitung mit dem Begriff *Erosion* bezeichnet und bedeutet das selektive Löschen von Bildpunkten, indem jeder Bildpunkt eines dargestellten Objekts mit einer verschieblichen Maske verglichen wird (hier die Kreuzform bzw. die Kreisform) und nur die Bildteile des Objekts erhalten bleiben, die vollständig von der Maske verdeckt werden können. Die Erosion liefert also diejenige Menge von Bildpunkten, die gleich dem Durchschnitt von Bildelementen und Maskenelementen sind.

Die Lage des Referenzkreuzes ist bekannt, ebenso der Bereich (ca. $30 * 30$ Pixel), in dem der Passpunkt wahrscheinlich belichtet wird. Die Erosion wird auf diesen Bereich, die sogenannte "Region of Interest" (*roi*) begrenzt. Das mehrmalige "Erodieren" liefert den Schnittpunkt der Kreuzstruktur (Referenz) bzw. die Kontur der Kreisstruktur (Passpunkt). Über eine Massenschwerpunktsbestimmung beider Flächen wird der Ort von Referenz- und Passpunkt bestimmt.

Schwerpunktberechnung in der Ebene

Unter dem Schwerpunkt eines (ebenen) Gebiets G bezüglich einer Massendichte $p(x, y)$ versteht man den Punkt $x_s := (x_s, y_s)$ mit den Koordinaten

$$x_s := \frac{1}{M} \int_G p(x, y) x dx dy \quad y_s := \frac{1}{M} \int_G p(x, y) y dx dy \quad (5.16)$$

Durch Erosion des Referenzkreuzes (R-Kanal) erhält man zunächst das Skeleton und mit der Formel 5.16 den Schwerpunkt.

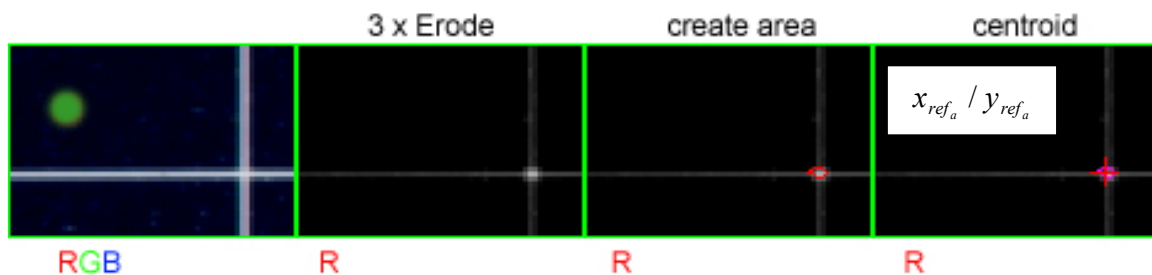


Abb.5.3.: Finden des Schnittpunktes des Referenzkreuzes

Analog erfolgt die Bestimmung des Passpunktes (G-Kanal).

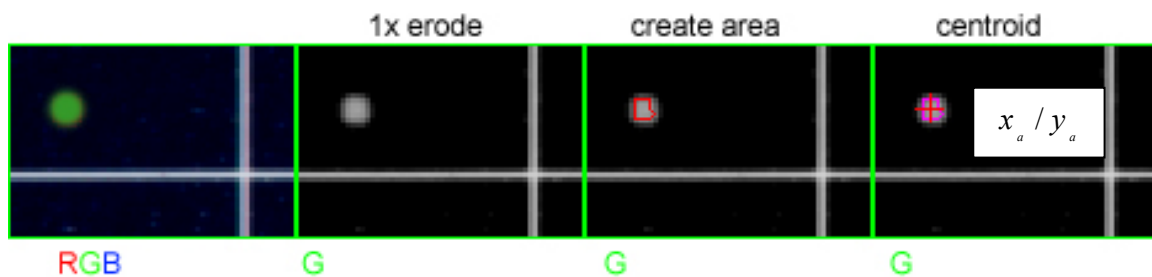


Abb.5.4.: Finden des belichteten Passpunktes

Die absoluten Koordinaten $x_{ref_{a,c}} / y_{ref_{a,c}}$ und $x_{a,c} / y_{a,c}$ können jetzt zur beschriebenen Berechnung der Lageparameter verwendet werden. Das Auffinden der Konvergenz Passpunkte (Abb. 3.6.) verläuft analog.

5.3 Photometrische Parameter – Densitometrie

Die für eine Dichtekalibrierung des Laserecorders notwendigen Daten erhält man durch die Auswertung des Graukeiles. Zunächst wird dafür die Schleierdichte (base) bestimmt.



Abb.5.5.: Die Schleierdichte wird zwischen den Perforationen gemessen

Schleierdichte

Zwischen den Perforationen (unbelichtet) wird zuerst über eine Apertur von $150 * 150$ Pixeln der Luminanzwert des Schleiers ermittelt und mit dem Korrekturvektor zur Berücksichtigung des Scannerstreulichtes $DEN'_i(y_k)$ (4.19) multipliziert.

$$base_i \text{ mit } i = R, G, B \quad (5.17)$$

$$DEN'_i(y_k) = base_i \cdot DEN_i(y_k) \quad (5.18)$$

Es werden die Vektoren $D_i(y_k)$ mit $k = 1..21$ und $i = R, G, B$ mit den Luminanzwerten y (integrierend $100 * 100$ Pixel) für die Graustufen ermittelt.

Von diesen wird das Scannerstreulicht $DEN'_i(y_k)$ abgezogen

$$D'_i(y_k) = D_i(y_k) - DEN'_i(y_k) \quad (5.19)$$

und dann werden mit Anwendung der Matrix L (4.23) die Status M Dichten berechnet

$$D'_i(y_k) L = D_i(d_k) \quad (5.20)$$

5.4 RMS, Signalstörabstand

Das Rauschen wird getrennt für die Kanäle R , G , B bei einer mittleren Dichte betrachtet.

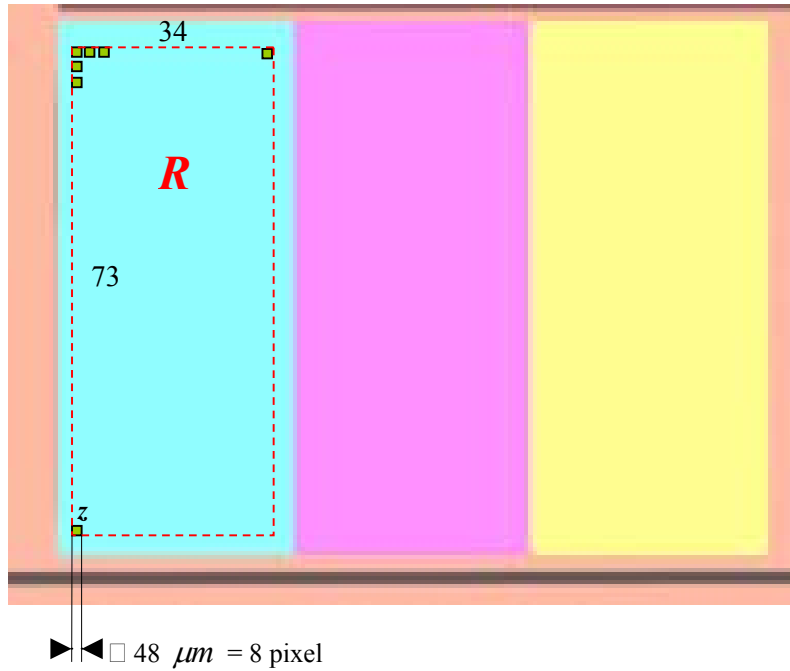


Abb.5.6.: Testmuster für die Signalstörabstandsberechnung

Die vereinbarte Messapertur (Kapitel 1.4) von $48\mu m$ wird durch Mittelung von jeweils $8 * 8$ Pixeln erreicht und kann über einen Parameter in der Software variiert werden:

$$z_i(j) \text{ mit } j = 1..8, i = R, G, B \quad (5.21)$$

$$y = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z(j) \quad (5.22)$$

Es ergibt sich für die R, G, B Luminanzwerte ein Vektor mit $34 * 73 = 2487$ Elementen:

$$R_i(y_k) \text{ mit } k = 1..2487, i = R, G, B. \quad (5.23)$$

Durch Umrechnung mit L

$$R'_i(y_k) * L = R_i(d_k) \quad (5.24)$$

ergeben sich die Status M Dichten von denen die Schleierdichte $base_i$ (5.19) abgezogen wird:

$$R'_i(d_k) = R_i(d_k) - base_i. \quad (5.25)$$

Aus den Elementen von $R_i(d_k)$ werden die Signale durch Mittelwertbildung bestimmt:

$$Signal_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k R'_i(d_k) \quad (5.26)$$

und die Störung

$$Störung_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k (Signal_i - R'_i(d_k))^2 \quad (5.27)$$

Für die vereinbarten Kenngrößen zur Beschreibung des Rauschens gilt:

$$\text{Diffuse RMS Granularity } RMS_i = 10^3 * \sqrt{Störung_i} \quad (5.28)$$

$$\text{Signal Rauschabstand } SNR_i = 20 \log \frac{Signal_i}{\sqrt{Störung_i}} \text{ dB} \quad (5.29)$$

5.5 Homogenität der Belichtung

Wie bereits in Kapitel 1.7 erwähnt, vereinfacht die Technik, mit der das Filmbild im Laserrecorder belichtet wird, die Überprüfung der meisten photometrischen Größen. Durch den zeilenweisen Bildaufbau reproduzieren sich Helligkeitsschwankungen entlang der Bildhöhe. Eine Messung der Belichtungshomogenität beschränkt sich im Wesentlichen auf einen über zehn Zeilen gemittelten horizontalen Schnitt.



Abb.5.7.: Testmuster für die Belichtungshomogenität

Abb. 5.7. zeigt den Verlauf des Zeilenschnittes und den Bereich der zur Berechnung des Mittelwertes verwendet wird.

$$S_i(y_k) \text{ mit } k = 1..255 \text{ und } i = R, G, B \quad (5.30)$$

Von diesem wird nun das Scannerstreulicht $SHA'_i(y_k) = SHA_i(y_k) * base_i$ abgezogen.

$$S'_i(y_k) = S_i(y_k) - SHA'_i(y_k) \quad (5.31)$$

Durch Anwendung der Matrix L werden die Luminanzwerte $S'_i(y_k)$ in Status M Dichten $S_i(d_k)$ umgerechnet.

$$S''_i(y_k) L = S_i(d_k) \quad (5.32)$$

Nun werden im Bereich der Bildmitte ($n = 50$) die Mittelwerte \overline{S}_i bestimmt:

$$\overline{S}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(d_n) \quad (5.33)$$

Die Differenz

$$S'_i(d_k) = S_i(d_k) - \bar{S}_i \text{ auf } \bar{S}_i \text{ normiert} \quad (5.34)$$

ergibt die Vektoren mit den relativen Dichteabweichungen zur Bildmitte.

5.6 Streulicht, eingeführt durch die Laserbelichtung

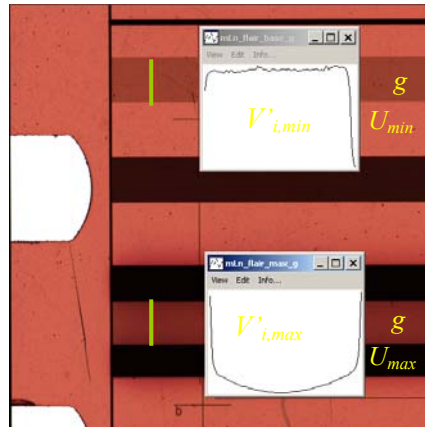


Abb. 5.8.: Beispiel für Streulicht

Das Testmuster zeigt im vertikalen Schnitt ein von seinem Umfeld abhängiges Dichteprofil. Der für das Testmuster verwendete Grauwert g belichtet das Material an dieser Stelle leicht vor. Das geschieht, um die Schwelle der Latenzbelichtung zu überschreiten, ein Bereich in dem Belichtung nicht in Dichte umgewandelt wird.

Tritt nun Streulicht auf, wird es in vollem Umfang auf die vorhandene Belichtung aufaddiert. Verglichen werden die zwei Dichtevektoren an der jeweils gleichen x -Position, einmal mit einem Umfeld ohne Belichtung U_{min}

$$V'_{i,min}(y_k) \text{ mit } k = 1..80 \text{ und } i = R, G, B, \quad (5.35)$$

bzw. durch Umrechnung in Dichten mit L

$$V'_{i,min}(y_k) L = V_{i,min}(d_k) \quad (5.36)$$

und für den Schnitt mit maximaler Umfeldbelichtung U_{max}

$$V'_{i,max}(y_k) \text{ mit } k = 1..80 \text{ und } i = R, G, B. \quad (5.37)$$

$$\text{bzw. } V'_{i,max}(y_k) L = V_{i,max}(d_k) \quad (5.38)$$

Zur Charakterisierung des Streulichtverhaltens wird einerseits die absolute Abweichung der Dichtevektoren voneinander,

$$V_{\Delta i} = V'_{i,max} - V'_{i,min} \quad (5.39)$$

verwendet, andererseits das Maß der „Verschleifungen“ der idealerweise rechteckigen Helligkeitsprofile, die über das Integral des Vektors $V_{\Delta i}$ beschrieben werden können.

$$FPV_i = \int_0^i V_{\Delta i} dd \quad (5.40)$$

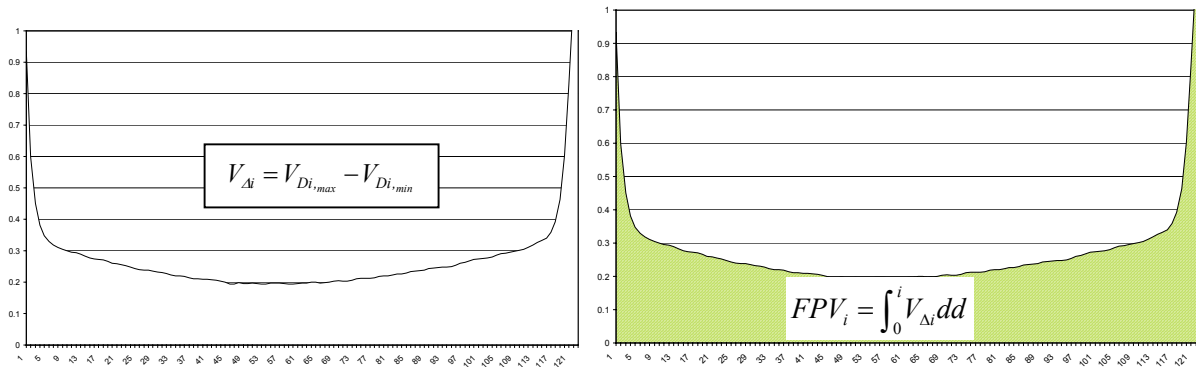


Abb.5.9.: Differenzvektor und Fläche unter dem Vektor als Streulichtkenngröße

Durch die Tatsache, dass Streulicht mit der Belichtung ansteigt, muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die absolute Dichte des „Streulicht erzeugenden Umfeldes“ von Belichtung zu Belichtung variieren kann. Dies geschieht sowohl durch unterschiedliche Kalibrierung der Belichter, als auch durch Schwankungen des Entwicklungsprozesses. Dieser Einfluss kann dadurch in die Kenngröße mit einbezogen werden, dass man die ermittelten Integralwerte FPV relativ zur Dichte ihres Umfeldes betrachtet.

$$FPV(rel)_i = \frac{D_{max_i}}{FPV_i} \quad (5.41)$$

5.7 Linearitätsüberprüfung der akusto-optischen Modulatoren

In den AOM's werden den bis dorthin konstanten Helligkeiten der drei Laserstrahlen die digitalen Bilddaten aufmoduliert. Die Intensität jedes Strahles kann in 1023 (10 Bit) Stufen variiert werden. Voraussetzung für eine richtige Belichtung ist, dass ein streng linearer Zusammenhang zwischen den digitalen Werten und den am Film belichteten Dichten herrscht.

Überprüft wird die geforderte Linearität, in den drei Farben durch drei horizontale Schnitte Abb.5.10. der Gradienten in Rot, Grün und Blau.



Abb.5.10.: R,G,B und RGB-Gradient

$$A_i(y_k) \text{ mit } k = 1..1023 \text{ und } i = R, G, B \quad (5.42)$$

Auch hier werden das Scannerstreulicht $AOM'_i(y_k) = AOM_i(y_k) * base_i$ und die aktuelle Schleierdichte berücksichtigt.

$$A'_i(y_k) = A_i(y_k) - AOM'_i(y_k) \quad (5.43)$$

Die Luminanzwerte werden in Status-M-Dichten umgerechnet.

$$A'_i(y_k) L = A_i(d_k) \quad (5.44)$$

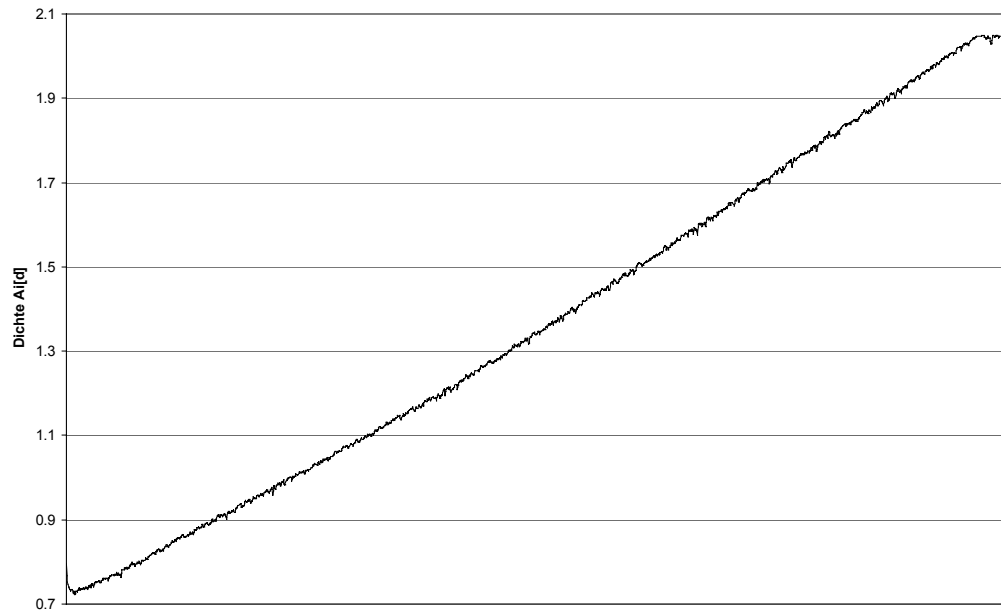


Abb.5.11.: Dichtewerte des Zeilenschnittes

Die Beurteilung erfolgt subjektiv. Eine gestörte AOM Kennlinie weist gegebenenfalls deutliche Abweichungen von der „Geradenform“ (Abb.5.11.) auf und kann leicht identifiziert werden.

5.8 Modulations Übertragungsfunktion MTF

Zur messtechnischen Bestimmung der MTF in Filmbildern gibt es prinzipiell zwei Ansätze. Der erste beruht auf der mikrodensitometrischen Analyse fester Ortsfrequenzen (wie in Kapitel 1 beschrieben), der zweite, wesentlich elegantere, auf der Fouriertransformation des Linienbildes einer Kante.

Das im Weiteren beschriebene Verfahren beruht im Wesentlichen auf einem ISO [L5.2] Vorschlag zur Auflösungsmessung an Digitalkameras. Für die MTF Messung am Film wurde dieses Verfahren angepasst, ein neues Filterkonzept und eine subjektive Bewertungsfunktion entwickelt.

Begriffsdefinitionen [L5.3]:

Edge Spread Function (ESF) :

Normiertes linearisiertes (siehe OECF) Kantenbild, erzeugt vom Laserrecorder.

Opto Electronical Conversion Function (OECF)

Übertragungskennlinie. Bei der Filmbelichtung beschreibt sie den (in der Regel nicht linearen) Zusammenhang zwischen Belichtung und der dadurch erzeugten Dichte am Film. Das für die MTF benötigte Kantenbild bezieht sich auf die Belichtung, die gemessenen Dichten am Film müssen also durch die Kennlinie auf die linearen Belichtungswerte rückgerechnet werden.

Für das bei der digitalen Filmbelichtung mit einem Laserrecorder verwendete Material 5242 liegt ein Sonderfall vor, der es erlaubt, diese Betrachtung zu übergehen. Die Kennlinie von 5242 ist im verwendeten Bereich streng linear, mit einer Steigung von 1. Die im Scan gemessenen Luminanzwerte können also ohne Umrechnung verwendet werden.

Line Spread Function (LSF)

Örtliche Signalverteilung bei der Abbildung einer unendlich feinen Linie. Theoretisch ist die LSF identisch mit der ersten Ableitung der Sprungfunktion (Kantenbild). Die inverse Faltung der LSF, der Abbildung mit dem Eingangssignal (LSF_{input}) ist gleich der Übertragungsfunktion bzw. der gesuchten MTF.

5.8.1 Kompensation der Phasenlage

Um die örtliche Abhängigkeit der Abtastung von der Lage des Pixelrasters zu kompensieren, wird die Kante leicht schräg gestellt und Kantenbilder für verschiedene Phasenlagen ermittelt.

Der im folgenden gezeigte Ablauf wurde exemplarisch an einer idealen Schwarz-Weisskante durchgeführt, die zur Simulierung der Gegebenheiten bei der Belichtung durch einen Laser mit einem Gaussprofil gefaltet wurde.

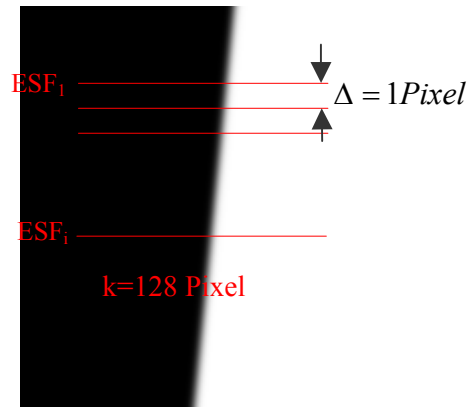


Abb.5.12.: Digital generierte Kante gefaltet mit einem Gaussprofil

Zunächst werden entlang der schrägen Kante horizontale Schnitte $ESF_i(y_k)$ im Abstand 1 Pixel gelegt .

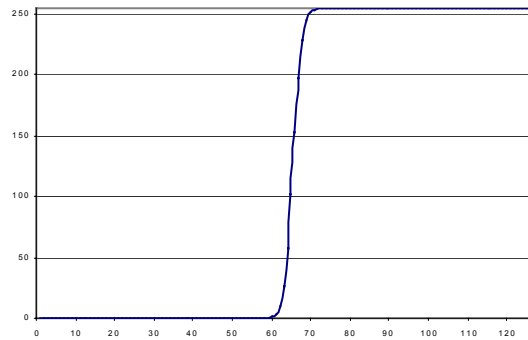


Abb.5.13.: $ESF_i(y_k)$

Um die Phasenlage der Kante zu ermitteln, wird für jeden Schnitt der Schwerpunkt berechnet. Die erste Ableitung des Kantenbildes ergibt die Steigungsfunktion bzw. das Linienbild mit dem Vektor

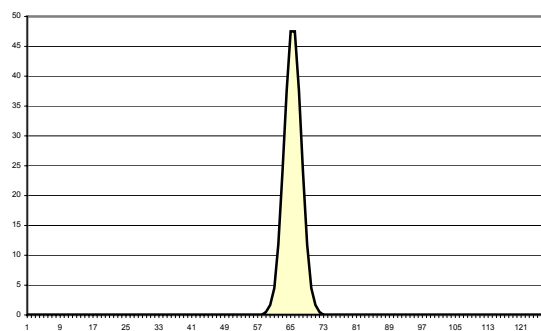


Abb.5.14.: $LSF_i(y'_k)$

Ist nun M die Maßzahl des Flächenstückes, des von $LSF_i(y'_k)$ und der X-Achse von 0 bis N eingeschlossenen Flächenstückes, so berechnen sich die Schwerpunktkoordinaten zu:

$$x_s := \frac{1}{M} \int_0^n LSF_i(y'_k) n dy' \quad y_s := \frac{1}{2M} \int_0^n [LSF_i(y'_k)]^2 dy'_k \quad (5.45)$$

Die Schwerpunkte SP_i der Linienbilder LSF_i verlaufen entlang der Kante. Durch die gefundenen Schwerpunkte kann eine Regressionsgerade gelegt werden, deren Steigung m gleich der Steigung der Kante ist.

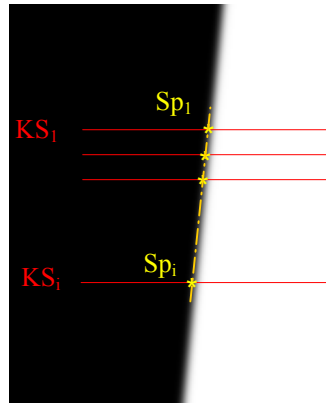


Abb.5.15.: Regressionsgerade

Definiert man:

$$[x] = \sum_{i=1}^n SP_i ; \quad [xx] = \sum_{i=1}^n SP_i^2 ; \quad [xy] = \sum_{i=1}^n SP_i y_i \quad \text{mit } y_i = 1, 2, \dots, i, \quad (5.46)$$

so gilt für die Steigung der Regressionsgeraden rg :

$$m = \frac{n[xy] - [x][y]}{n[xx] - [x]^2} \quad (5.47)$$

Aus der Steigung kann einfach die Phasenlage berechnet werden, d.h. bei welchem i ausgehend von i_0 der Schwerpunkt genau um ein Pixel in x „gewandert“ ist.

$$\Delta i = mx = m \quad (5.48)$$

Teilt man die Phase in vier Bereiche auf, so erzielt man eine vierfach feinere Abtastung, als durch das Pixelraster vorgegeben.

Man sortiert die ermittelte Anzahl der Kantenschnitte Δi in vier Bereiche ein, deren Schwerpunkt SP_i um jeweils 0,25 Pixel, 0,5 Pixel, 0,75 Pixel und 1 Pixel verschoben sind.

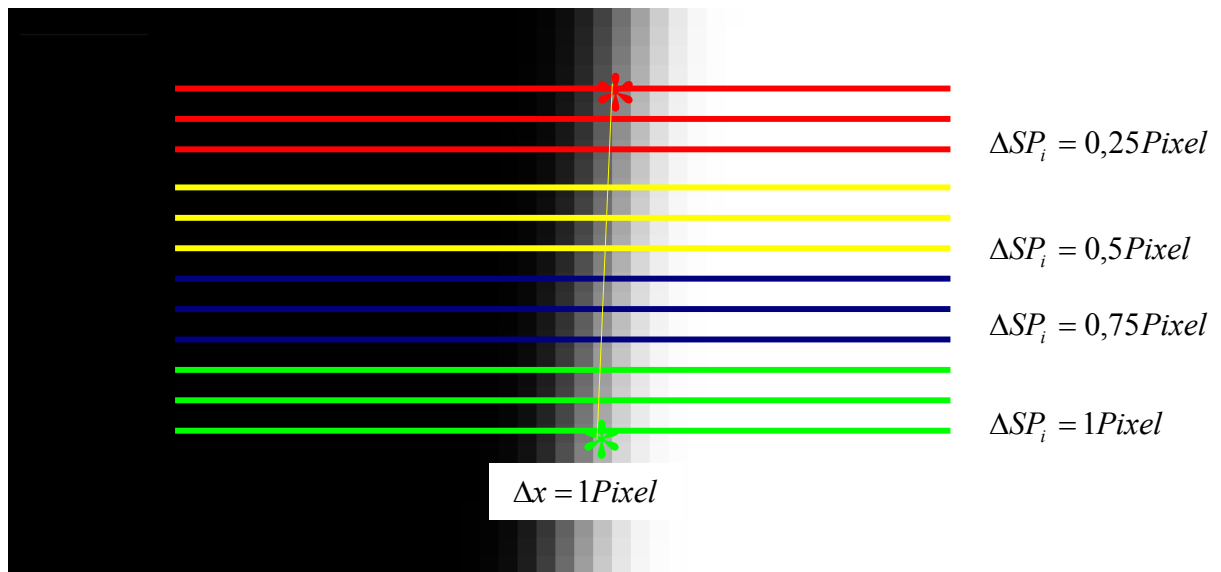


Abb.5.16.: Einteilung der Kantenschnitte

Nun wird für jeden der vier Bereiche ein mittleres Kantenbild berechnet.

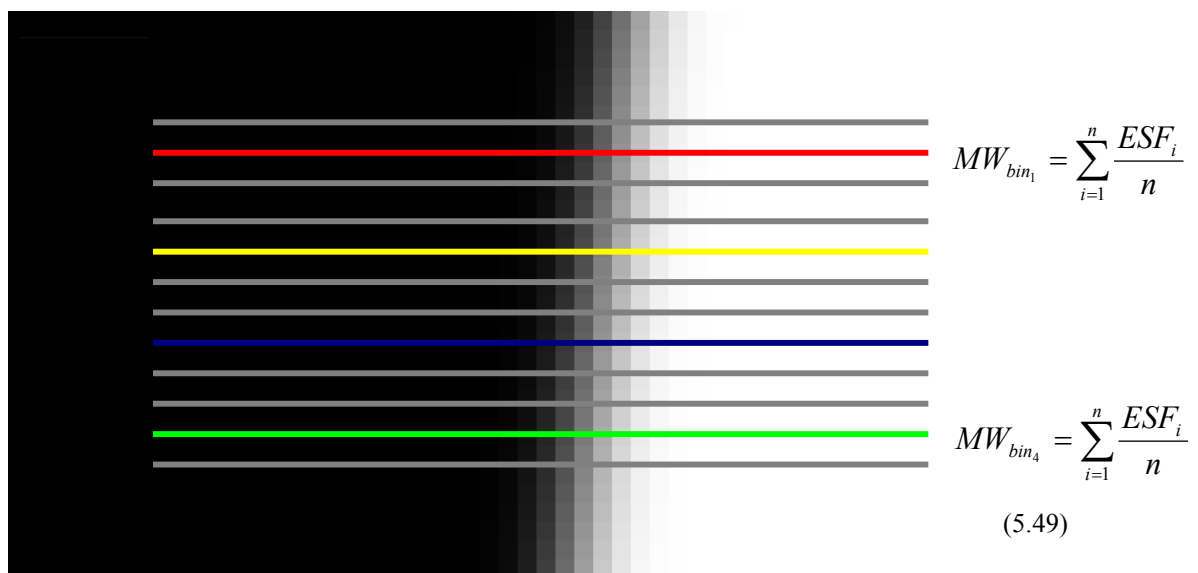


Abb.5.17.: Mittelwert der vier Bereiche

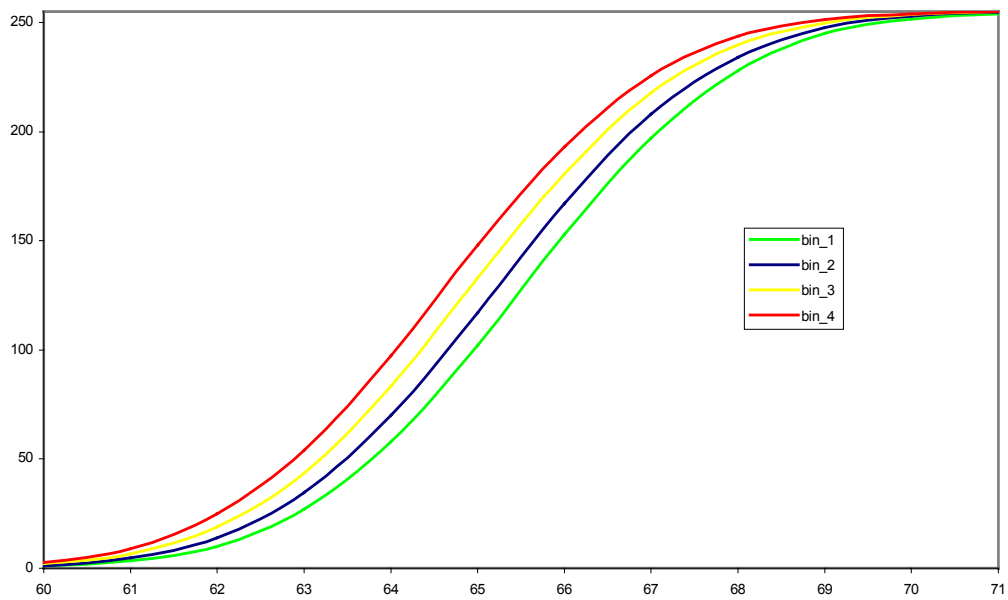


Abb.5.18.: Ausschnitt ($x[60-71]$) aus den gemittelten Kantenbilder aus den vier Bin's

Die gemittelten Kantenbilder werden in einen Vektor mit der vierfachen Länge einsortiert Abb.5.19.

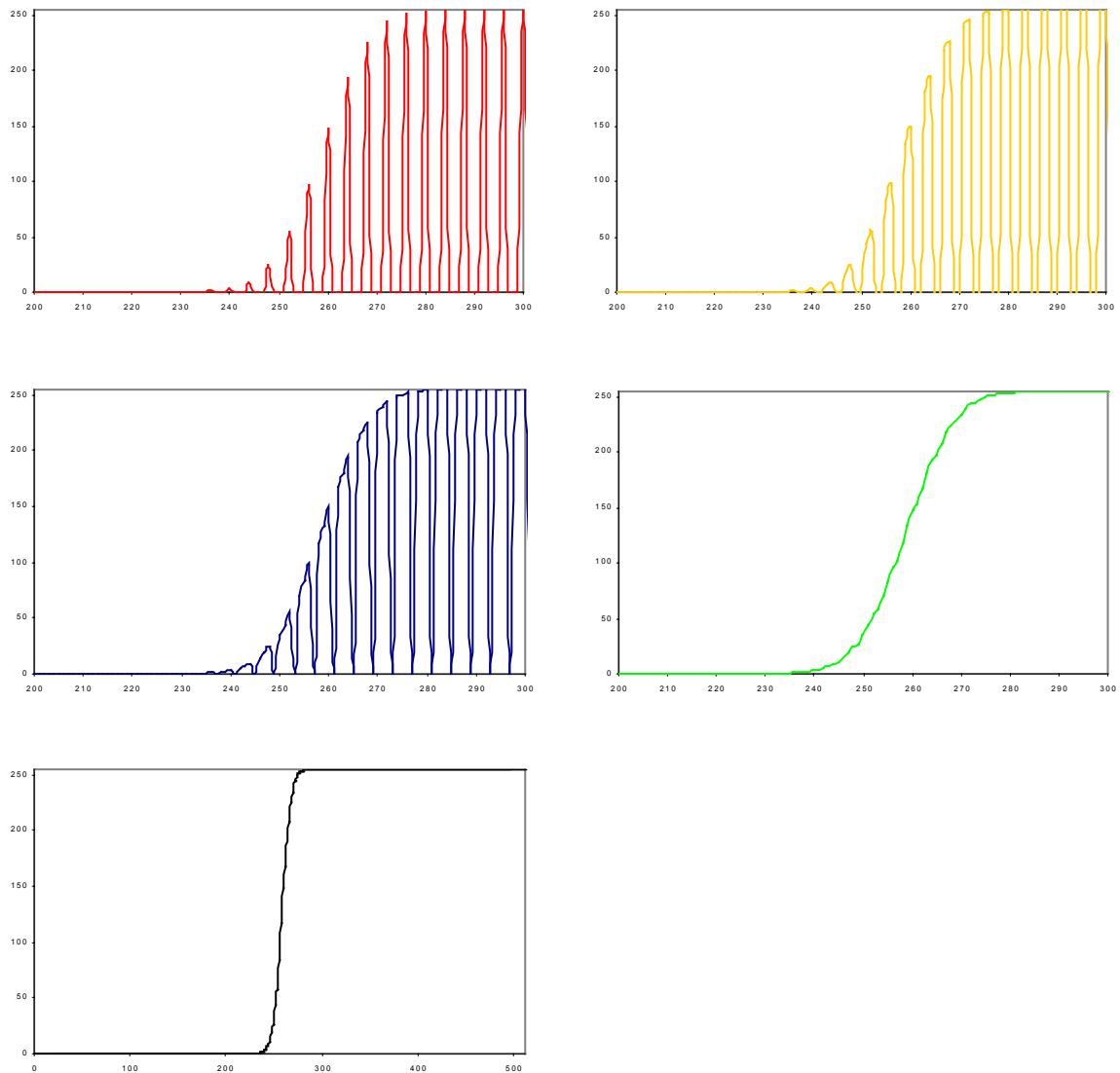


Abb.5.19.: Kantenbild $ESF(y_l)$ mit vierfach höherer Abtastrate

5.8.2 Berechnung der MTF

Man erhält so ein neues, von der Lage des Abtaststrahlers unabhängiges, Kantenbild mit einer vierfach höheren Abtastrate. Im Beispiel wurden aus ursprünglich 128, 512 Werte.

$$ESF(y_l) \text{ mit } l = 4 * n = N \quad (5.50)$$

Ist nun $LSF(y'_l)$, der durch Ableitung von $ESF(y_l)$ ermittelte Vektor für das Linienbild des neuen Kantenbildes, so kann die MTF durch die komplexe Fouriertransformation des Linienbildes ermittelt werden.

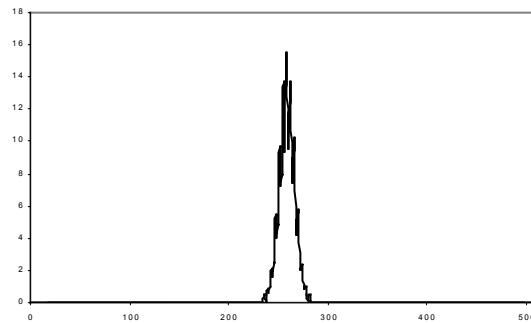


Abb.5.20.: Linienbild $ESF(y_l)$

Nb. Die sonst naheliegende Verwendung der FFT (FastFourierTransformation) ist hier von Nachteil, weil sie stets 2^n Werte für die Abtastung voraussetzt. Mit der komplexen Fouriertransformation kann eine MTF Berechnung mit beliebigen Stützstellen durchgeführt werden. Das heißt der Algorithmus kann universell und unabhängig von der Kantengröße eingesetzt werden.

Für den Realteil bzw. Imaginärteil gilt:

$$Re_j := \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} y'_l \cos\left(\frac{2\pi j}{N} l\right) \quad Im_j := \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} y'_l \sin\left(\frac{2\pi j}{N} l\right) \quad \text{mit } j = 1..N. \quad (5.51)$$

Der Vektor der MTF wird nun durch komponentenweise Betragsbildung für jedes j gebildet:

$$MTF_j := \sqrt{(Re_j)^2 + (Im_j)^2} \quad (5.52)$$

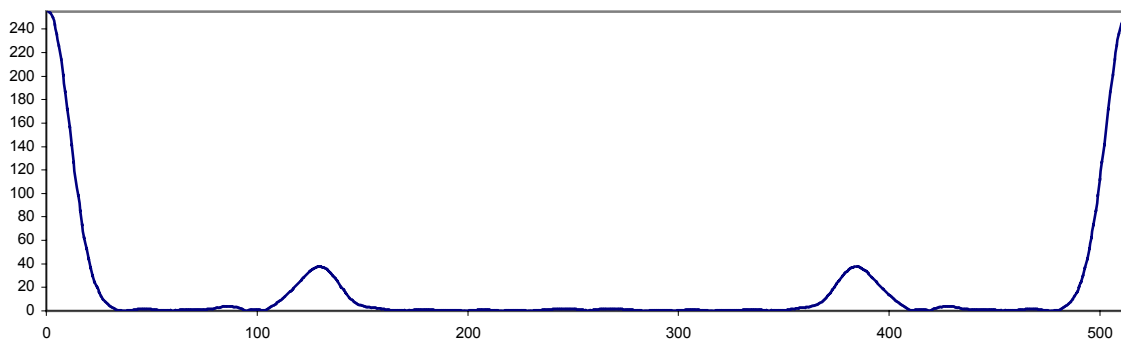


Abb.5.21.:komplexe Fouriertransformation der $ESF(y_l)$

Zur Normierung wird jede Komponente MTF_j durch MTF_0 geteilt.

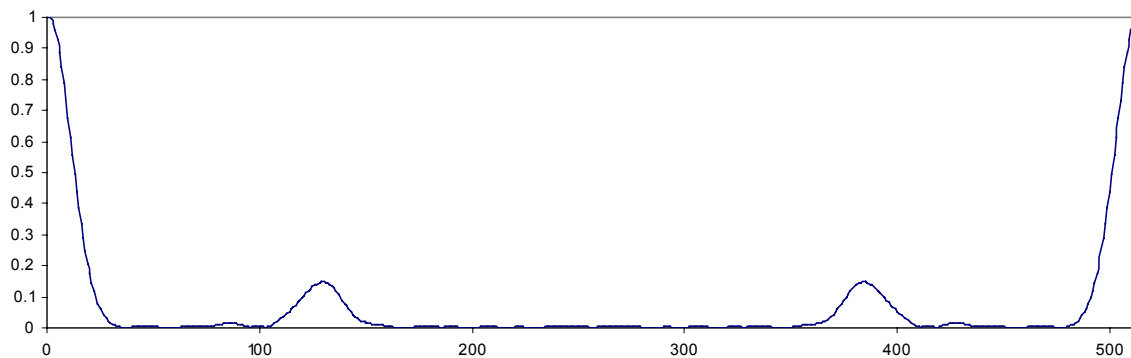


Abb.5.22.: Normierte komplexe Fouriertransformation der $ESF(y_l)$

Das CCD-Element des Analysescanners verwendet ein Pitch (Pixelraster) von 0,006 mm.

$$f_s = \frac{1}{0,006} \approx 80 \text{ Lp / mm} \quad (5.53)$$

Das ursprüngliche Kantenbild wurde also über eine Länge von

$$T_0 = 0,006 \text{ mm} * 128 \text{ Pixel} = 0,768 \text{ mm} \quad (5.54)$$

abgetastet.

Das entspricht einer Ortsfrequenz von

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{0,768} = 1,302 \text{ Lp / mm} . \quad (5.55)$$

Definiert man nun

$$f_i = j * f_0 \quad (5.56)$$

und begrenzt die Darstellung auf die halbe Abtastfrequenz, so erhält man die allgemein übliche Darstellung der MTF.

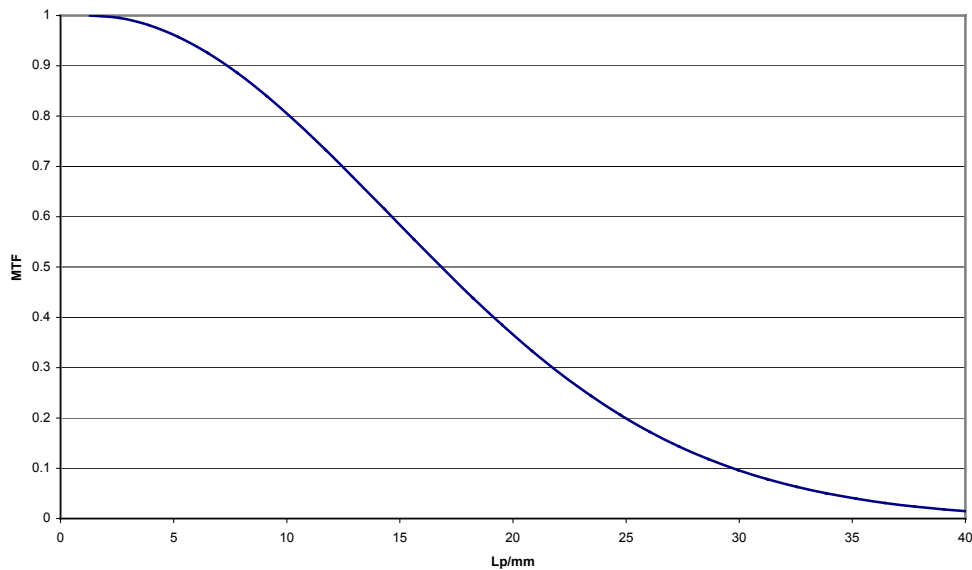


Abb.5.23.: MTF

5.8.3 Berücksichtigung von Signalstörungen

Bei der MTF Messung realer Filmproben erschwert sich der beschriebene Ablauf durch ein in der Messtechnik wohl allgegenwärtiges Problem: das zu analysierende Signal ist verrauscht (Abb. 5.24.). Verunreinigungen der Filmoberfläche werden ebenso mitdigitalisiert wie Kornzusammenballungen oder mechanische Emulsionsbeschädigungen.

Das von der ISO für die Kantenanalyse empfohlene Falten der *ESF* mit einem Hanningfenster [L5.4] liefert zwar eine gute Glättung der Randbereiche, ist jedoch bei weitem nicht ausreichend. Eine mathematisch sehr radikale aber effektive Methode ist die Anwendung eines Abschneidefilters; sie führt zu „kosmetisch“ glatten MTF Kurven. Zu beachten ist, dass dieses Vorgehen nur solange ein realistisches Resultat liefert, wie der Randbereich der *ESF* eine Steigung nahe „0“ aufweist.

Ist die Steigung von „0“ verschieden, führt das Abschneiden und Auffüllen mit horizontalen Werten zu einer Beeinflussung der für die subjektive Bewertung wichtigen niedrigen Ortsfrequenzen und somit zu einer aussagelosen MTF.

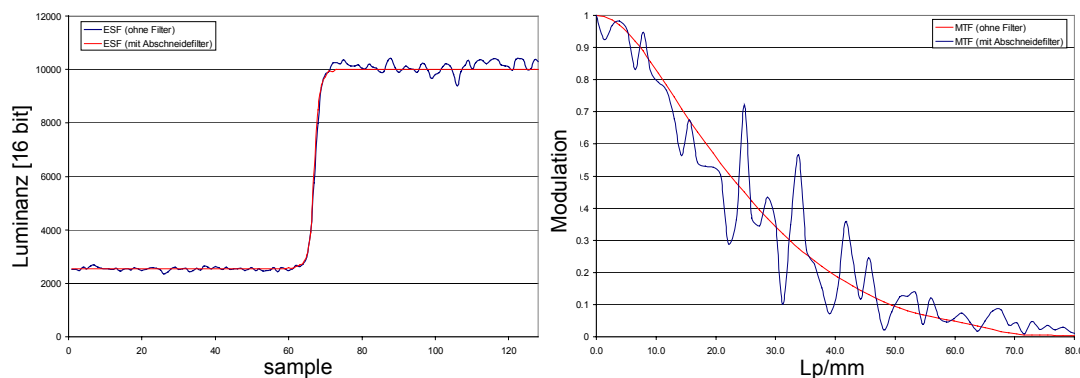


Abb.5.24.: Einfluss des Rauschens auf die Kante (links) und MTF (rechts)

6 Benutzeroberfläche der Software

Im letzten Kapitel soll das Ergebnis der Arbeit vorgestellt werden. Es bietet sich an, dies anhand der entwickelten Software zu versuchen. Sie führt den Benutzer Schritt für Schritt durch alle beschriebenen Messprozeduren und liefert als Resultat ein Protokoll mit der graphischen Darstellung der Daten.

Für den automatisierten Ablauf des Messvorganges und zur Erstellung eines Userinterface wurde das Runtime-Modul der Bildverarbeitungssoftware Optimas® verwendet. Dieses bietet die Möglichkeit, sich wiederholende Abläufe der Bildverarbeitung sowie der Bildanalyse zu automatisieren. Neben der normalen Aufzeichnung von Abläufen über einen Makrorecorder können über eine sehr umfangreiche Programmiersprache ALI (Analytic Language for Images) individuelle Benutzerschnittstellen hinzugefügt werden.

Parallel zu Optimate® (Runtime-Modul von Optimas) wird eine mit VBA® (Visual Basic for Applications) programmierte Microsoft Excel® Datei für die graphische Darstellung (Abb. 6.9.) und die Speicherung der Messwerte verwendet. Die in Abb. 6.0 dargestellte Menüstruktur gibt die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte vor.

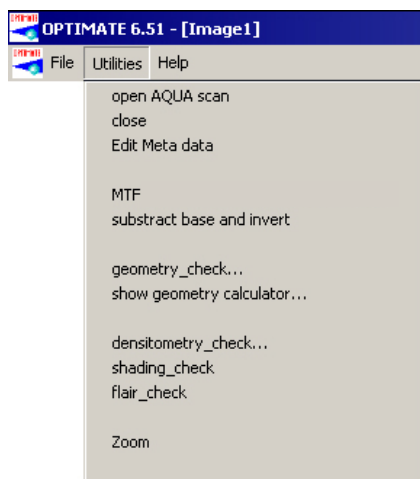


Abb.6.0.: Menüstruktur der Benutzeroberfläche

6.1 Laden des Scans „open AQUA scan“

Der eigentliche Messvorgang beginnt mit dem Scannen des ausbelichteten Testnegatives und dem Öffnen des Scans, mit dem automatisch die Erfassung von Metadaten verknüpft ist. Das Eingabefeld „pitch“ legt fest, mit welcher Spotgröße das Bild belichtet wurde. Mit diesem Wert können gemessene Längen in „Belichtungspixel“ rückgerechnet werden.

The image shows a 'META DATA' dialog box with a blue title bar. It contains several input fields: 'ARRILASER No.' with the value '000', 'date and time' with 'Fri Jul 13 09:57:04 2001', 'pitch' with '0.006', 'Scanner ID' with 'usa', and 'Fixture ID' with '002'. At the bottom, there is a 'REASON ?' label above a text input field, and an 'OK' button.

Abb.6.1.: Metadaten

Über die Felder „Scanner ID“ und „Fixture ID“ wird der richtige Kalibrierungs-Parametersatz ausgewählt. Im Feld „Reason“ wird der Benutzer aufgefordert anzugeben, aus welchem Grund die Analyse durchgeführt wurde. Dafür gibt es eine Anzahl festgelegter Schlüsselbegriffe, die nachträglich das Auffinden häufiger Fehlerursachen erleichtern sollen .

Die Ergebnisse werden im **Anzeigebereich 1 der Übersicht Abb. 6.9.**, Seite 78 dargestellt.

6.2 MTF

Für die MTF Messung wählt der Benutzer einen Startpunkt in der Nähe des jeweiligen (R,G,B) Kantenüberganges hier im Beispiel die vertikale grüne (im Negativ magenta) Kante zur Bestimmung der horizontalen MTF.

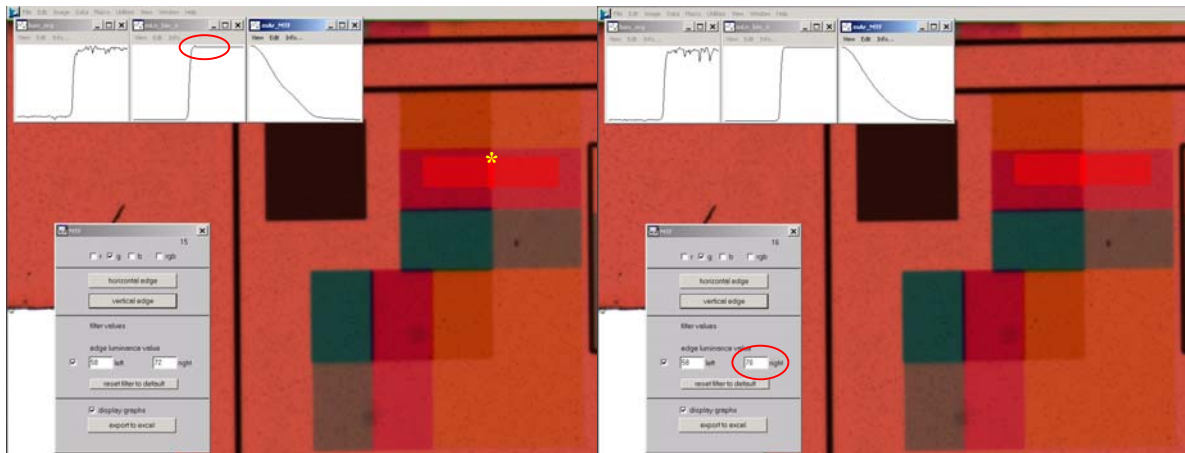


Abb.6.2.: MTF-Prozedur

Der Abschnidefilter kann manuell verändert werden (Beispiel: rechter Grenzwert). Die Taste „export to excel“ übermittelt die Werte an die Exeldatei, in der diese zusammen mit den Grenzwerten (Abb. 2.20.) dargestellt werden.

Die Ergebnisse werden im **Anzeigebereich 2 der Übersicht Abb.6.9.** Seite 78 dargestellt.

6.3 Anpassung für die subjektive Betrachtung „subtract base and invert“

Zur besseren subjektiven Beurteilung einiger Kriterien (Schärfe, Streulicht, Konvergenz) wird das Negativ für die Darstellung am Bildschirm umgekehrt und die Schleierdichte abgezogen Abb. 6.3.

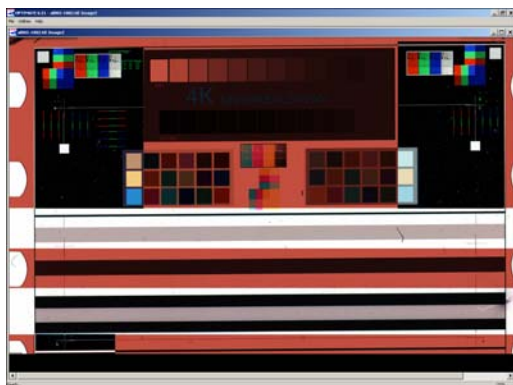


Abb.6.3.: Analysescan mit angepasster Positiv-Darstellung

6.4 Geometry Check

Die Auswahl dieses Menüpunktes startet die automatische Geometrieberechnung und zeigt das Ergebnisfenster.

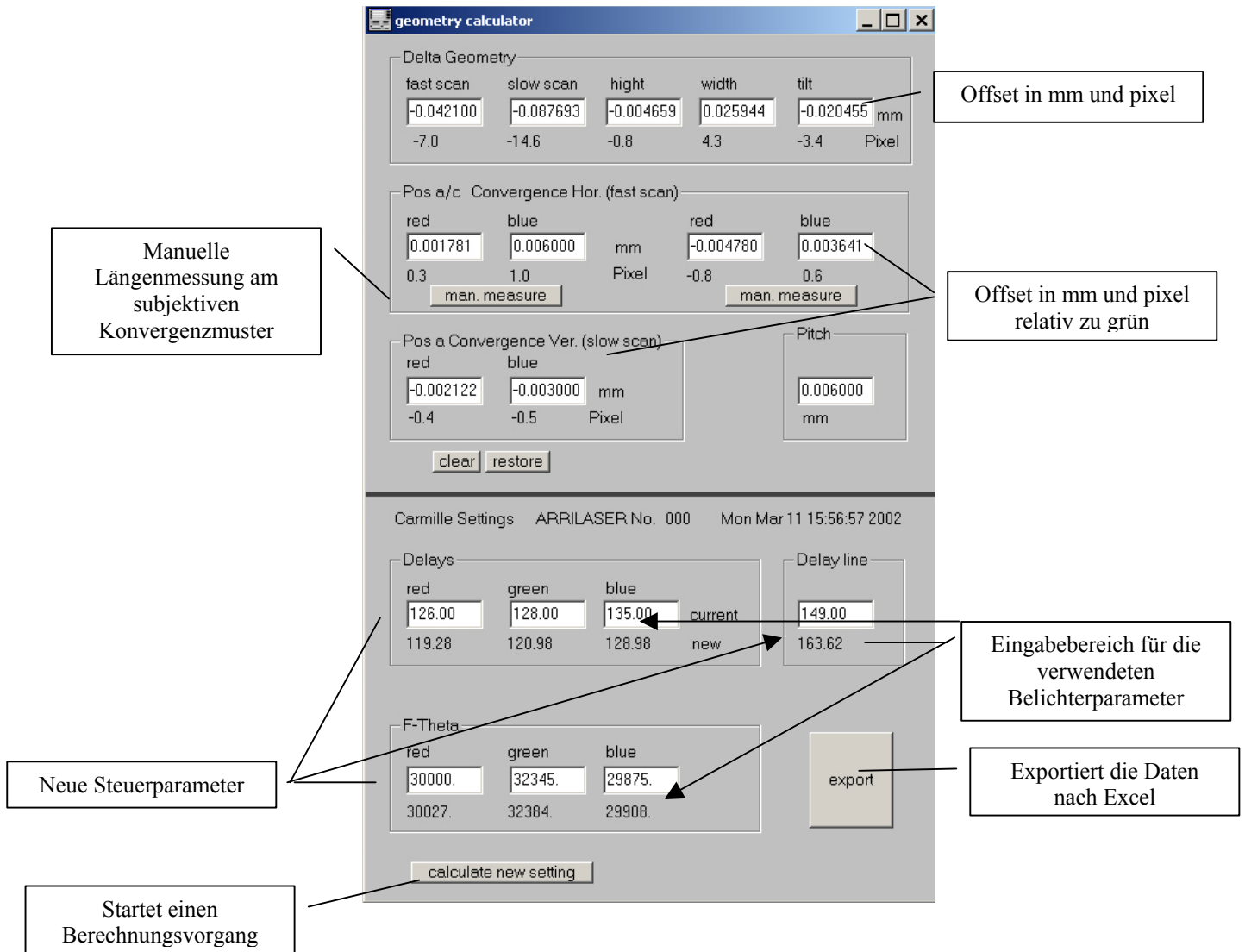


Abb.6.4.: Ergebnisfenster der Geometriemessung

Die Ergebnisse werden im **Anzeigebereich 3 der Übersicht Abb.6.9.**, Seite 78 dargestellt.

6.5 Densitometry Check

Der Menüpunkt *Densitometry Check* startet die Messprozedur zur Bestimmung der Status M Dichten in den 21 Graufeldern und löst automatisch die RMS, SNR Bestimmung aus.



Abb.6.5.: Menü der Dichtemessung

Die Ergebnisse werden im **Anzeigebereich 4,7** der Übersicht *Abb.6.9.*, Seite 78 dargestellt.

6.6 Shading Check, Flair Check (Homogenität und Streulicht)

Beide Menüpunkte lösen eine automatische Routine aus und erfordern vom Benutzer lediglich das Setzen eines Startpunktes für die Schnitte. Beim „Shading Check“ ist dies der Anfangspunkt *a* des mittleren Graustreifens.

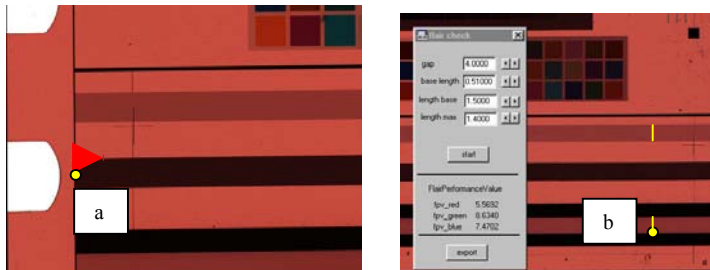


Abb.6.6.: Homogenität und Streulichtmessung

Beim „Flare Check“ wird der Benutzer aufgefordert, dort den Startpunkt *b* zu setzen, wo maximales Streulicht erkennbar ist.

Die Ergebnisse werden im **Anzeigebereich 5,6** der Übersicht *Abb.6.9.*, Seite 78 dargestellt.

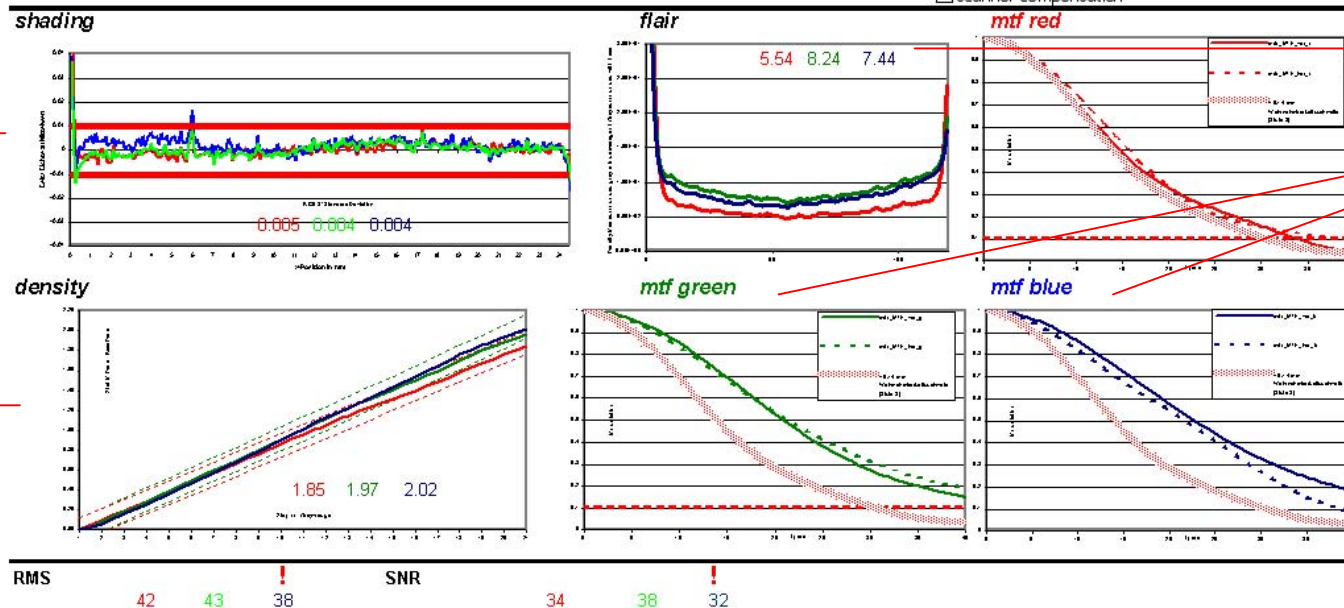
ARRILASER STATIC IQ PARAMETER



Laser Id	000	date	Mon Mar 11 16:35:02 2002	AQUA Scanner	xxx
Expo. Pitch	0.006 mm			AQUA Fixture	ref
reason	0				

ARRILASER settings				geometry offset				convergence offset rel. to green			
	red	green	blue		[mm]	[mm]	[Pixel]		[mm]	[mm]	[Pixel]
Delay	126	128	135	old	fast	slow	fast	slow	red	blue	red
F-Theta	30000	32345	29875	old	pos a	-0.042	-0.088	-7.0	0.002	0.006	0.3
Sliding Car.	149			old	width	0.026		4.3	pos c hor	-0.005	0.004
					high		-0.005	-0.8			-0.8
					tilt		-0.020	-3.4	pos a ver	-0.002	-0.003
Delay	119	121	129	new							-0.4
F-Theta	30027	32384	29908	new							-0.5
Sliding Car.	164			new							

☐ scanner compensation



by aquamat 04_2002_Beta

Abb.6.9.: Übersicht, Analyseprotokoll

6.7 Einige Zusatzfunktionen

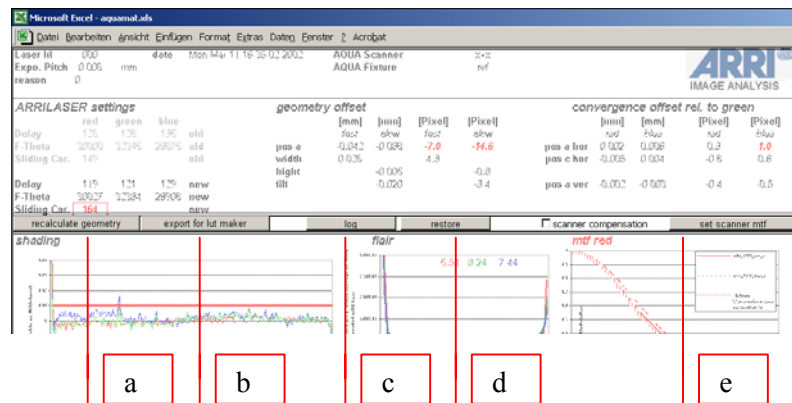


Abb.6.10.: Bedienmenü in Excel

Position *a* „recalculate geometry“:

Es kommt vor, dass zum Zeitpunkt der Messung die Recorder Steuerparameter nicht verfügbar sind. Diese Funktion erlaubt das nachträgliche Berechnen der Kompensationsparameter, ohne die Geometriemessung wiederholen zu müssen

Position *b* „export for lut maker“:

Erzeugt eine Textdatei mit den Densitometriedaten für die Recorderschnittstelle zur Dichtekalibrierung.

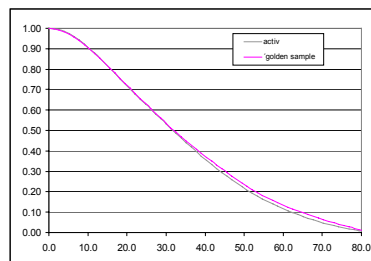
Position *c* „log“:

Speichert alle Messwerte in eine Datenbank, die in die Exceldatei integriert ist. Die gespeicherten Werte können ohne große Mühe sortiert und mit den statistischen Standardfunktionen von Excel analysiert werden.

Position *d* „restore“:

Holt gespeicherte Messungen zur Vervollständigung (pos. a) oder zum Vergleich aus der Datenbank.

Position *e* „set scanner mtf“:



Führt der Benutzer eine MTF Messung an den Referenzkanten (4.4) durch, kann über diese Funktion die Scanner-MTF gespeichert werden. Es wird dann ein „golden sample“ eingeblendet, das zeigt, ob die aktuelle Schärfe des Scanners ausreichend ist. Eine Checkbox neben der Schaltfläche aktiviert die Scanner-MTF-Kompensation.

Abb.6.11.: Scanner MTF

7 Ausblick

Bildgüteparameter aus digitalen Daten zu errechnen, ist gerade in der Filmmesstechnik ein naheliegendes und seit langem praktiziertes Vorgehen. Bis dato scheiterten diese Versuche jedoch dann, wenn es um die Notwendigkeit ging, absolute Messgrößen in Basiseinheiten zu erzeugen. Der Ansatz, eine photometrische und geometrische Referenz zum festen Bestandteil der Probe zu machen, löst dieses Problem und ermöglicht die Funktionalität eines Messmikroskopes, eines Densitometers und eines Mikrophotometers in einem transportablen, kostengünstigen und trotzdem präzisen Messwerkzeug zusammenzufassen. Die Zusammenfassung und Systematisierung der Messungen in eine einfach zu bedienende Software erleichtert die Arbeit der Serviceingenieure.

Die Bildschärfe-Bewertung am Film über eine ISO-konforme MTF-Messung erlaubt erstmals den objektiven Vergleich verschiedener Proben mit einem international anerkannten Standard; dies gilt ebenso für die Streulichtmessung - ein Parameter, für den es bisher überhaupt kein Messkriterium gab.

Die Kalibrierung der photometrischen Daten auf die Status-M-Charakteristik bringt einen ähnlichen Vorteil mit sich – alle densitometrischen und mikrodensitometrischen Werte sind mit Standard-Densitometern austauschbar. Die Speicherung und Verwaltung der gesammelten Messdaten ist die Grundlage der Prozesskontrolle für die Herstellung des ARRILASER's und unterstützt die Langzeitbeobachtung der Geräte im Feld.

Momentan wird eine Stabilitätsstudie im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH für Photoingenieurwesen- Köln durchgeführt, die mit dem Verfahren Aufschluss über die Konstanz und Vergleichbarkeit der relevanten Qualitätsparameter aller 106 Belichtersysteme bringen soll.

Weiterentwicklung des Messsystems

Die Analyse an einem Bild als Momentaufnahme ist zwar ein wichtiger Bestandteil der Qualitätsbeurteilung, einige Parameter zeigen jedoch ihren Einfluss erst bei dynamischer Betrachtung.

Ziel eines Anschlussprojektes ist, die hier entwickelten statischen Verfahren auf Bildsequenzen anzuwenden. Des Weiteren ist geplant, auch die Qualitätsüberwachung anderer Bereiche, wie z.B. Scanner, Filmabtaster, Kopiermaschinen oder Digital Kameras mit ähnlicher Analysetechnik zu realisieren.

Die Anwendung dieses Verfahrens birgt einen unschätzbaren Vorteil – es sorgt dafür, dass die Qualität der Informationsspeicherung durch die gesamte Film-Kette hoch bleibt. Fehler und Verschleifungen der Filmqualität, die mit heutigen digitalen Systemen der Postproduktion und der Projektion nicht sichtbar sind und deshalb oft vernachlässigt werden, können in naher Zukunft durch Verbesserung eben dieser Technologien auf einmal an Bedeutung gewinnen.

Schlusswort



Es sei erwähnt, dass kurz vor Fertigstellung dieser Arbeit dem ARRILASER eine große Ehre zuteil wurde – er erhielt die in der Medientechnik wohl höchste Auszeichnung, den Scientific and Engineering Award der Academy of Motion Picture Arts and Sciences - den technischen Oscar. Dies, so hieß es im Schreiben der Academy, vor allen Dingen für seine ausgezeichnete Bildqualität und zu dieser hat das vorgestellte Verfahren seinen Beitrag geleistet, deshalb gebührt ihr auch ein kleiner Teil des Oscars – sagen wir mal der linke kleine Zeh.

Danksagung

Die vorgelegte Arbeit entstand während meiner Tätigkeiten als Ingenieur der Abteilung Forschung & Entwicklung der Firma Arnold & Richter München.

An erster Stelle möchte ich Herrn Professor Falter danken, der als Doktorvater und Erstgutachter hinter dieser Arbeit steht und dessen wohlwollende Weisung mich durch alle Untiefen der Universitätsbürokratie lotste.

Herrn Professor Sigurd Kusch möchte ich herzlich für die wertvolle Unterstützung in allen optischen Bereichen der Arbeit danken.

Den Herren Professoren Fellbaum, Kiese Wetter und Woll danke ich für das entgegenbrachte Interesse an meiner Arbeit und für die Erstellung des Gutachtens.

Großer Dank gebührt meinen Kollegen bei Arnold & Richter,

Herrn Dr. Peter Geissler und Herrn Dr. Achim Oehler für die fachliche Betreuung und die Geduld mit der sie mir Allzeit (und das meine ich auch so !) kompetent zur Seite standen.

Herrn Dipl. Phys. Christian Buerckstümmer für seine gestrenge und kompromisslose Kritik bei der Erstellung der Kantenanalyseprozedur. Nicht zu vergessen Dipl. Math. Ulrich Klocke vom Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik, Freiburg, dem ich für seinen unermüdlichen väterlichen Rat danke.

Stephan Ukas Bradley, Richard Antley, Kevin Irvin ARRI Inc. und Martin Krefft, die mir zur rechten Zeit Arbeit abnahmen, die eigentlich meine Sache gewesen wäre. Frl. Anja Metzinger und Frl. Nicola Rebelein (die Reihfolge hat nichts zu bedeuten) für die Ausmerzungen sämtlicher orthographischer, grammatikalischer und interpunktioneller Unzulänglichkeiten.

Ein herzlicher Dank an die Familie Handschack, bei der ich während zahlreicher Wochen in Cottbus ein echtes Zuhause und neue Freunde gefunden habe.

Vor allem aber danke ich dem Geschäftsführer von Arnold & Richter, Herrn Dipl. Ing. Franz Kraus, denn diese Arbeit wäre nie entstanden ohne sein Vertrauen und die Freizügigkeit, mit der er mich die letzten drei Jahre gewähren ließ.

Literaturnachweis

Bücher:

- [L 1.2] Vieth, Gerhard (1973): Messverfahren der Photographie, Brunswick
- [L 1.3] Naumann, H., Schröder, G.(1983): Bauelemente der Optik, München, Wien
- [L 1.5] Haferkorn, Heinz (1988): Lexikon der Optik, Leipzig
- [L5.1] Zimmer, Bonz (1996): Objektorientierte Bildverarbeitung, Datenstrukturen und Anwendungen in C++ , München
- [L5.2] Gonzalez, C. Rafael (1997): Digital Image Processing, San Jose
- [L5.3] DeCusatis, Casimer (1998): Handbook of Applied Photometry, San Jose
- [L5.4] .Jain, Anil K. (1997): Fundamentals of Digital Image Processing, San Diego
- [L 2.1] Rosenbruch, Eggert K-J(1975): Untersuchung über die Abbildungsqualität von optischen Instrumenten für den visuellen Gebrauch mit Hilfe eines simulierten Auges
- [L 3.1] Schober, H. (1970): Das Sehen, VEB Fachbuchverlag Leipzig 4. Auflage, Leipzig
- [L 3.1b] Zenner, Hans Peter (1994): Physiologie der Sinne“ Spektrum Akademischer Verlag der Wissenschaft

Dissertationen:

- [L 1.1] Beutelhauser, Roland (1987): Hochauflösende Digitale Photographie“
Promotion TU München 1987

Fachzeitschrift

- [L E1] Steurer Johannes (2001), FK TG ARRILASER – „Der neue Standard der digitalen Filmbelichtung“, FKT 1.10.2001 Hüthig Verlag, Berlin

Normen und Datenblätter

- [L 1.4] Datenblatt der Fa. Rodenstock (1998): „F-Theta-Ronar“, München
- [L5.5] ISO/TC42N 4398

WWW-Seiten:

- [L 4.1] Glossary of Motion Picture Terms,
<http://www.kodak.com/country/US/en/motion/students/handbook/glossary3.jhtml>
10.02.2002

Eigene Veröffentlichungen und Vorträge zum Thema:

„Untersuchung über den Zusammenhang zwischen der Modulationsübertragungsfunktion von Fernsehkameraobjektiven und der resultierenden Bildschärfe“

Veröffentlichung, Fachzeitschrift Fernseh und Kinotechnische Gesellschaft FKT, Juni 1994, Hüthig Verlag.

„A Proposal for rating the subjective sharpness of television pictures-investigations into the correlation between the MTF of TV camera lenses and the resulting image sharpness“

Veröffentlichung, Fachzeitschrift SMPTE Journal (Society of motion picture and television engineers), Oktober 1994 Los Angeles

“Objective Comparison between a LCD Electronic Cinema Projector and 35 mm Film Projection”

Vortrag bei Alcatel Espace, August 1996 Eindhoven, Cinenet Consortium Meetings

“Quality losses of the conventional 35 mm film production-chain”

Vortrag bei Kodak, September 1997 Rochester, Screen Check Consortium Meeting

“Vor -und Nachteile der anamorphotischen Aufnahmetechnik für das Breitwandformat Cinemascope”

Gastvorlesung an der Filmakademie, Mai 1998 Ludwigsburg

“Electronic Cinema”

Vortrag bei IPM, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik, Mai 1999, Freiburg

“Bildgütevergleich digitaler Cinefilm-Belichter”

Vergabe und Betreuung einer Diplomarbeit im Fachbereich Photoingenieurwesen und Medientechnik an der Fachhochschule Köln, August 2000

“Digital film recording with CRT's and solid-state-laser based systems“

Vortrag Mai 2001, spring conference ASC (American Society of Cinematographers) Hollywood.

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb.E.1.: Digitalfilm</i>	6
<i>Abb.E.2.: Prinzip CRT-Recorder</i>	7
<i>Abb.E.3.: Optischer Aufbau, bestehend aus dem Optik-Modul und dem Scanner- Modul</i>	8
<i>Abb.E.4.: Strahlablenkung und Filmvorschub (Scanner Modul)</i>	9
<i>Abb.1.1.: Spektrale (normierte) Helligkeitsverteilung der Status M Charakteristik</i>	12
<i>Abb.1.2.: Kennlinie des Materials 5242 und Verwendung des linearen Bereiches</i>	12
<i>Abb.1.3.: Berechnung der Empfindlichkeit bei Dichte 0.1 über Schleier</i>	13
<i>Abb.1.4.: Laser Wellenlänge Arrilaser - spektrale Empfindlichkeit EXR 5242</i>	14
<i>Abb.1.5.: RMS Granularity als Maß für das Rauschen in Abhängigkeit der Filmdichte</i>	15
<i>Abb.1.6.: Modulationsübertragung</i>	16
<i>Abb.1.7.: Kodak 5242 MTF</i>	17
<i>Abb.1.8.: 4K Bildgröße in Pixel</i>	18
<i>Abb.1.9.: F-Theta Objektiv</i>	19
<i>Abb.1.10.: Geometrische Steuerparameter</i>	20
<i>Abb.1.11. Geometrische Position und Bildgröße</i>	21
<i>Abb.1.12.: Prinzip der Belichtung durch einen ARRILASER</i>	22
<i>Abb.2.1.: Konventioneller Kopierwerksprozeß</i>	24
<i>Abb.2.2.: Original Negativ und Kopie erster Generation</i>	25
<i>Abb.2.3.: Mikroskopbild (100-fach) links Negativ, rechts Kopie (Positiv)</i>	25
<i>Abb.2.4.: links Negativ, rechts Kopie erstellt mit einer Kontaktkopiermaschine</i>	26
<i>Abb.2.5.: MTF der Kopie vom Original Negativ über Step -und Kontaktkopiermaschine (BH2)</i>	26
<i>Abb.2.6.: Kopie vom Intermednegativ (4 Generation)</i>	27
<i>Abb.2.7.: Ausschnitt im Mikroskopbild links Negativ, rechts Kopie vom Intermed Negativ</i>	27
<i>Abb.2.8.: MTF der Kopie vom Intermed Negativ (4. Generation)</i>	27
<i>Abb.2.9.: Psychooptische Betrachtungsbedingung im Kino</i>	28
<i>Abb.2.10.: Auflösungsgrenze für einen Betrachtungsabstand von 10 m</i>	29
<i>Abb.2.11.: Prinzip der stufenweisen Defokussierung am ARRILASER</i>	31
<i>Abb.2.12.: Systematischer Ablauf der subjektiven Testfilmerstellung</i>	31
<i>Abb.2.13.: links wird die ideal fokussierte Szene belichtet</i>	32
<i>Abb.2.14.: rechts defokussierte Szene</i>	32
<i>Abb.2.15.: Kopie des Testfilms</i>	32
<i>Abb.2.16.: Projektion im ARRI Kino</i>	33
<i>Abb.2.17.: Belichtung Stufe 1 [Nullpkt.], Defokussierung</i>	34
<i>Abb.2.18.: Belichtung Stufe 2, Defokussierung</i>	34
<i>Abb.2.19.: Belichtung Stufe 8</i>	34
<i>Abb.2.20 MTF der Fokusstufen am Negativ</i>	35
<i>Abb.3.1.: Analyseablauf</i>	36
<i>Abb.3.2.: Universaltestbild</i>	37
<i>Abb.3.3.: Kanten für die Auflösungsmessung</i>	38
<i>Abb.3.4.: Rechteckraster für die subjektive Auflösungsbeurteilung</i>	38
<i>Abb.3.5.: Streulichtartefakt</i>	39
<i>Abb.3.6.: Passpunkt und Konvergenztestmuster</i>	40
<i>Abb.3.7.: subjektives Konvergenztestmuster</i>	40
<i>Abb.3.8.: Vorspann mit Metadaten</i>	41
<i>Abb.3.9.: Koordinatensystem</i>	43
<i>Abb.3.10.: Skizze der Glasplatte mit Referenzmuster (CAD-Zeichnung im Anhang)</i>	44
<i>Abb.3.11.: Glasplatte mit Referenzmuster, eingebaut in der Halterung</i>	44
<i>Abb.3.13.: Halterung im Diaeinschub des Scanners</i>	45
<i>Abb.3.14.: Ausschnitt eines Analysescans links ohne, rechts mit Filmprobe</i>	45
<i>Abb.4.1.: Justiervorrichtung</i>	46
<i>Abb.4.3.: Kalibriernegativ</i>	47
<i>Abb.4.5.: Rastergraukeil mit darüber gelegtem Negativ im Scan</i>	48
<i>Abb.4.6.: Dichtewerte der 18 Rasterkeilstufen</i>	49

<i>Abb.4.7.: Original Macbeth Colorchecker</i>	50
<i>Abb.4.8.: Macbeth Colorchecker mit erhöhter Dynamik</i>	50
<i>Abb.4.8.: „Rohe“ Scannerdichten im Vergleich zur Status-M-Dichte der 48 Macbeth Felder</i>	51
<i>Abb.4.9.: Zusammenhang zwischen Scannerdichten und Status-M-Dichten in den Grundfarbkeilen</i>	52
<i>Abb.4.10.: Matrixaufbau</i>	53
<i>Abb.4.11.: Scannerdichten nach der Umrechnung im Vergleich zur Status M Dichte</i>	55
<i>Abb.4.12.: MTF des Analysescanners gemessen an der aufgedampften Referenzkante</i>	57
<i>Abb.5.1.: Position der Testmuster zur Geometriebestimmung</i>	58
<i>Abb.5.2.: Obere Bildhälfte: Ausschnitte a, c im Scan, darunter die Systematik der Bezeichnung.</i>	58
<i>Abb.5.3.: Finden des Schnittpunktes des Referenzkreuzes</i>	61
<i>Abb.5.4.: Finden des belichteten Passpunktes</i>	61
<i>Abb.5.5.: Die Schleierdichte wird zwischen den Perforationen gemessen</i>	62
<i>Abb.5.6.: Testmuster für die Signalstörabstandsberechnung</i>	63
<i>Abb.5.7.: Testmuster für die Belichtungshomogenität</i>	64
<i>Abb. 5.8.: Beispiel für Streulicht</i>	65
<i>Abb.5.9.: Differenzvektor und Fläche unter dem Vektor als Streulichtkenngröße</i>	66
<i>Abb.5.10.: R,G,B und RGB-Gradient</i>	66
<i>Abb.5.11.: Dichtewerte des Zeilenschnittes</i>	67
<i>Abb.5.12.: Digital generierte Kante gefaltet mit einem Gaussprofil</i>	69
<i>Abb.5.13.: $ESF_i(y_k)$</i>	69
<i>Abb.5.14.: $LSF_i(y'_k)$</i>	69
<i>Abb.5.15.: Regressionsgerade</i>	70
<i>Abb.5.18.: Ausschnitt (x[60-71]) aus den gemittelten Kantenbilder aus den vier Bin's</i>	72
<i>Abb.5.19.: Kantenbild $ESF(y_l)$ mit vierfach höherer Abtastrate</i>	72
<i>Abb.5.20.: Linienbild $ESF(y_l)$</i>	73
<i>Abb.5.21.:komplexe Fouriertransformation der $ESF(y_l)$</i>	73
<i>Abb.5.23.: MTF</i>	75
<i>Abb.5.24.: Einfluss des Rauschens auf die Kante (links) und MTF (rechts)</i>	75
<i>Abb.6.1.: Metadaten</i>	76
<i>Abb.6.2.: MTF-Prozedur</i>	77
<i>Abb.6.3.: Analysescan mit angepasster Positiv-Darstellung</i>	77
<i>Abb.6.4.: Ergebnisfenster der Geometriemessung</i>	78
<i>Abb.6.5.: Menü der Dichtemessung</i>	79
<i>Abb.6.6.: Homogenität und Streulichtmessung</i>	79
<i>Abb.6.10.: Bedienmenü in Excel</i>	81
<i>Abb.6.11.: Scanner MTF</i>	81

Glossar

H	Belichtung		
E	Beleuchtungsstärke	lx	
t	Beleuchtungszeit	sec	
D	Dichte		
τ	Transmissionsgrad		
S, S_x	Empfindlichkeit	Din, ASA	
SNR	Signal Störabstand	dB	
L	Leuchtdichte	Cd/m ²	
M	Modulation		
T	Modulationsübertragungsfaktor		
MTF	Modulationsübertragungsfunktion		
2K, 4K	Pixelanzahl pro Bildbreite (2000,4000)		
y'	Bildhöhe	mm	
f	Brennweite	mm	
Θ	Objektwinkel		
	Ortsfrequenz	Lp/mm	Linienpaare pro mm
$V(\lambda)$	Spektrale Bewertungsfunktion des menschlichen Auges		

ANHANG

BESCHREIBUNG DES UNIVERSALTESTBILDES

Testfeld Nr.	1
Parameter	Homogenitaet der Ausleuchtung
Messung	Stat M RGB Dichte ueber eine Appertur von 1 mm kombiniert mit pos 4,9

Position im Bild	Grösse			
	x	y	lx	ly
links oben	30	30	100	100
links unten	30	2812		
mitte				
rechts oben	3966	30		
rechts unten	3966	2812		

Grauwerte	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
	r	g	b	r	g	b
	111	111	111	0.21	0.22	0.22

Testfeld Nr.	2
Parameter	MTF
Messung	Stat M RGB Kantenprofil/ ISO MTF

Position im Bild	Groesse pro Farbe			
[pix]	x	y	lx	ly
links oben	75	1	270	360
links unten	75	2750		
mitte	1868	1263		
rechts oben	3660	1		
rechts unten	3105	2750		

Grauwerte	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
	r	g	b	r	g	b
min	180	180	180	0.36	0.36	0.36
max	684	684	684	1.368	1.368	1.368

Kontrast	58 %
-----------------	-------------

Testfeld Nr.	3
Parameter	Schärfe
Messung	subjektiv
	Rechteckige Helligkeitsverteilung

Position im Bild	Groesse			
[pix]	x	y	lx	ly
links oben	352	57	404	210
links unten	352	2836		
mitte	1794	862		
rechts oben	3244	57		
rechts unten	3244	2836		

Grauwerte		10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film			Kontrast	
		r	g	b	r	g	b		
min		0	0	180	0	0	0.36		
max		445	445	445	0.89	0.89	0.89	100%	1.Reihe
min		180	180	180	0.36	0.36	0.36		
max		445	445	445	0.89	0.89	0.89	42%	2.Reihe
min		180	180	180	0.36	0.36	0.36		
max		180	685	445	0.36	1.37	0.89	58%	3.Reihe

Ortsfrequenzen	10	27	40	80	Lp/mm
-----------------------	----	----	----	----	-------

Testfeld Nr. 4
Parameter Kalibrierung
Messung Stat M RGB Dichte ueber eine Appertur von 1 mm

Position im Bild			Groesse	Feld 1-21
[pix]	x	y	lx	ly
links oben	1007	104	166	208
links unten				
mitte				
rechts oben				
rechts unten	2790	767		

Grauwerte

10 Bit Wert im Bild

Stat M Ziel Dichte am Film

r	g	b	r	g	b
0	0	0	0	0.00	0.00
51	51	51	0.09	0.10	0.10
102	102	102	0.19	0.20	0.20
153	153	153	0.28	0.31	0.31
204	204	204	0.38	0.41	0.41
255	255	255	0.47	0.51	0.51
306	306	306	0.57	0.61	0.61
357	357	357	0.66	0.71	0.71
408	408	408	0.76	0.82	0.82
459	459	459	0.85	0.92	0.92
510	510	510	0.95	1.02	1.02
561	561	561	1.04	1.12	1.12
612	612	612	1.13	1.22	1.22
663	663	663	1.23	1.33	1.33
714	714	714	1.32	1.43	1.43
765	765	765	1.42	1.53	1.53
816	816	816	1.51	1.63	1.63
867	867	867	1.61	1.73	1.73
918	918	918	1.70	1.84	1.84
969	969	969	1.80	1.94	1.94
1023	1023	1023	1.89	2.05	2.05

Testfeld Nr. 5/14
Parameter Farbe
Messung subjektiv/Mikrodensitometrisch
 Macbeth Colorchecker

Position im Bild				Groesse	
[pix]	x	y	lx	ly	
mitte links	785	925	970	502	
mitte rechts	2365	2836			
patch			133	137	

Grauwerte

	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
links pos 14	r	g	b	r	g	b
patch 1	360	176	108	0.72	0.352	0.216
patch 2	796	496	436	1.592	0.992	0.872
patch 3	276	432	608	0.552	0.864	1.216
patch 4	232	324	120	0.464	0.648	0.24
patch 5	500	448	716	1	0.896	1.432
patch 6	404	800	704	0.808	1.6	1.408
patch 7	868	376	84	1.736	0.752	0.168
patch 8	216	284	664	0.432	0.568	1.328
patch 9	888	232	284	1.776	0.464	0.568
patch 10	284	120	288	0.568	0.24	0.576
patch 11	592	772	180	1.184	1.544	0.36
patch 12	932	596	112	1.864	1.192	0.224
patch 13	36	140	596	0.072	0.28	1.192
patch 14	216	596	180	0.432	1.192	0.36
patch 15	948	100	80	1.896	0.2	0.16
patch 16	1020	808	120	2.04	1.616	0.24
patch 17	912	276	548	1.824	0.552	1.096
patch 18	160	504	716	0.32	1.008	1.432
Rahmen	24	48	72	0.048	0.096	0.144

rechts pos 5	r	g	b	r	g	b
patch 1	340	244	216	0.68	0.488	0.432
patch 2	580	424	448	1.16	0.848	0.896
patch 3	292	388	568	0.584	0.776	1.136
patch 4	268	328	224	0.536	0.656	0.448
patch 5	416	396	644	0.832	0.792	1.288
patch 6	364	596	636	0.728	1.192	1.272
patch 7	620	356	200	1.24	0.712	0.4
patch 8	260	304	608	0.52	0.608	1.216
patch 9	632	276	340	1.264	0.552	0.68
patch 10	296	212	344	0.592	0.424	0.688
patch 11	468	580	268	0.936	1.16	0.536
patch 12	656	480	220	1.312	0.96	0.44
patch 13	160	224	560	0.32	0.448	1.12
patch 14	260	480	268	0.52	0.96	0.536
patch 15	664	200	196	1.328	0.4	0.392
patch 16	704	600	224	1.408	1.2	0.448
patch 17	644	300	528	1.288	0.6	1.056
patch 18	228	428	644	0.456	0.856	1.288
Rahmen	176	172	192	0.352	0.344	0.384

Testfeld Nr. 6/13
Parameter Streulicht horizontal
Messung Vergleichender Zeilenschnitt

Position im Bild	Groesse			
[pix]	x	y	lx	ly
pos 6	3545	1094	320	144
pos 13	355	1094		

Grauwerte						
pos 13	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
	r	g	b	r	g	b
Grau	100	100	100	0.2	0.2	0.2
Umfeld	1023	1023	1023	2.046	2.046	2.046
pos 6						
Grau	100	100	100	0.2	0.2	0.2
Umfeld	0	0	0	0	0	0

Testfeld Nr.	7/11
Parameter	Streulicht vertikal
Messung	subjektive Beurteilung

Position im Bild			Groesse		
	[pix]	x	y	lx	ly
pos 7		0	1477	4096	10
pos 11		0	2677		

Grauwerte		10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
		r	g	b	r	g	b
pos 13		1023	1023	1023	2.046	2.046	2.046
pos 6		1023	1023	1023	2.046	2.046	2.046

Testfeld Nr.	8/10
Parameter	Streulicht vertikal
Messung	vergleichender Zeilenschnitt

Position im Bild			Groesse		
	[pix]	x	y	lx	ly
pos 8		0	1583	4096	132
pos 10		0	2194	4096	320

Grauwerte		10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
		r	g	b	r	g	b
pos 8							
	Grau	100	100	100	0.2	0.2	0.2
	Umfeld	0	0	0	0	0	0
pos 10							
	Grau	100	100	100	0.2	0.2	0.2
	Umfeld	1023	1023	1023	2.046	2.046	2.046

Testfeld Nr.	12
Parameter	Gradient
Messung	Stat M RGB Dichte integrierend mit 0.5 mm Meßapertur

Position im Bild			Groesse	pro Farbe
	[pix]		lx	ly
links oben	860	2875	2245	40
links unten				
mitte				
rechts oben				
rechts unten	3105	2997		

Grauwerte	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
	r	g	b	r	g	b
$\Delta StatM_{RGB} = 0.008$	0	0	0	0	0.00	0.00
bis	1023	1023	1023	1.89	2.05	2.05

Testfeld Nr. 15 a,b,mitte,c,d
 Parameter Geometrie
 Messung x/y Koordinaten

Bezüglich einer 4k Belichtung mit 0.006 mm Spotgröße

[pix] x y
 Passpunkt Größe 3 3

p_0 :Abstand Mitte Referenzperfoloch zu Pixel 1 (Bildanfang)

Position im Bild				p_0	1.797	2.514
	[pix]	x	y	x[mm]	y[mm]	$x+p_0$
pos a	235	511	1.41	3.066	3.207	5.58
pos b	235	2600	1.41	15.6	3.207	18.114
Mitte	2048	1556	12.288	9.336	14.085	11.85
pos c	3860	511	23.16	3.066	24.957	5.58
pos d	3860	2600	23.16	15.6	24.957	18.114

Referenzkreuze

	x[mm]	y[mm]
pos a	3.327	5.7
pos b	3.327	17.994
Mitte		
pos c	24.837	5.7
pos d	24.837	17.994

Offset Passpunkt zu Referenzkreuz

	x[mm]	y[mm]
pos a	-0.12	-0.12
pos b	-0.12	0.12
Mitte		
pos c	0.12	-0.12
pos d	0.12	0.12

Grauwerte

	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
pos 8	r	g	b	r	g	b
Passpunkte rot	720	0	0	1.44	0	0
Passpunkte grün	0	720	0	0	1.44	0
Passpunkte blau	0	0	720	0	0	1.44

Testfeld Nr.	15	a,c
Parameter	Konvergenz	
Messung	x/y Koordinaten	

	[pix]	x	y
Passpunkt Größe		3	3

Position im Bild

links bei pos a

	[pix]	x	y
rot oben		215	458
rot rechts		228	471
grün mitte		215	471
blau links		202	471
blau unten		215	484

rechts bei pos c

	[pix]	x	y
rot oben		3880	458
grün mitte		3880	471
blau unten		3880	484

Grauwerte

	10 Bit Wert im Bild			Stat M Ziel Dichte am Film		
pos 15	r	g	b	r	g	b
Passpunkte rot	720	0	0	1.44	0	0
Passpunkte grün	0	720	0	0	1.44	0
Passpunkte blau	0	0	720	0	0	1.44